



Pedro Miguel Firmino Gonçalves

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Fachada de Vidro “Inteligente”

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Estruturas

Orientador: Filipe Pimentel Amarante dos Santos, Professor Auxiliar da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu
Vogal: Professor Doutor Filipe Pimentel Amarante dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2012

“Copyright” Pedro Miguel Firmino Gonçalves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Esta dissertação representa o fim, até à data, de mais uma etapa da minha vida, a formação académica. Quero assim aproveitar para agradecer a algumas pessoas pela sua presença e acompanhamento ao longo destes anos.

Em primeiro lugar, ao Professor Filipe Santos, não só pela confiança e oportunidade em si, como também por toda a disponibilidade demonstrada ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sem as quais nada disto teria sido possível. Um muito obrigado.

Em segundo lugar, aos meus amigos, nomeadamente os que se mantiveram presentes e constantes, tais como o João Correia, o Joaquim Silva, o Nelson Zacarias, o Mário Sanchez e, principalmente, a Célia Rodrigues. Tenho também a agradecer ao Frederico Abegão e à Viviana Delgado pela preciosa contribuição que me deram quando o tempo era meu inimigo. Obrigado a todos. Estou-vos eternamente grato.

Em terceiro lugar, aos que se fizeram, e fazem, passar por amigos. Sem vocês isto não teria tido a mesma graça. Fica aqui o meu obrigado.

Em seguida, aos meus tios, pelo apoio e disponibilidade demonstrados ao longo deste período.

Queria agradecer à Daniela Gomes, por nos últimos tempos ter sido uma presença e ajuda constantes, ao partilhar o seu amor, carinho e dedicação comigo.

Por último, e como os últimos são os mais importantes, aos meus pais e à minha irmã, por todo o amor e carinho que me dedicaram, pelos sacrifícios e dificuldades a que se submeteram para que terminasse este curso. Do fundo do coração, obrigado.

Resumo

A importância da arquitectura e o impacto que esta tem vindo a ter na engenharia nos últimos tempos tem sido colossal. A audácia dos arquitectos em tornarem as estruturas cada vez mais transparentes, com o intuito de uma maior sensação de comunicação com o meio envolvente, tem sido acompanhada pelo desenvolvimento da tecnologia.

As estruturas com fachadas de vidro têm-se evidenciado como solução para esta tendência arquitectónica. Contudo, deve-se garantir um equilíbrio entre a transparência, a segurança e o conforto que estas transmitem para quem as utiliza. Desta forma, surge a necessidade de criar estruturas em que estes aspectos se tornem o mais independentes possível.

A presente dissertação pretende contribuir para o estudo da aplicação de um sistema de controlo na estrutura portante de uma fachada de vidro, para limitar os seus deslocamentos devidos à acção dinâmica do vento.

O sistema de controlo, composto por cabos de pré-esforço activos, controla as deformações impostas pela acção do vento através da introdução de forças na estrutura, permitindo uma optimização do sistema estrutural da fachada [32].

Palavras chave:

Acção dinâmica do vento; Controlo estrutural; Fachadas de vidro; Pré-esforço activo.

Abstract

Architecture's importance and the increasing impact it has in engineering have been colossal in recent times. The audacity of architects in designing ever more transparent structures, for a better communication with the surrounding environment, has been accompanied by technology development.

Structures with glass façade are being adopted as a solution for this architectonic tendency. However, a balance between transparency, safety and comfort, must be assured. This way, there is a need for structures where these factors are as independent as possible.

The present dissertation intends to contribute for the application study of a control system for the load bearing structure of the glass façade, to limit its displacements due to the wind dynamic action.

The control system, made of active prestress cables, controls the wind action deformations through the introduction of loads in the structure, allowing an optimization of the façade's structural system [32].

Keywords

Wind dynamic action; Structural control; Glass façades; Active prestress.

Índice de Matérias

Resumo	i
Abstract	iii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos e metodologia	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Tipos de vidro	5
2.2.1 Vidro <i>float</i>	5
2.2.2 Vidro temperado	6
2.2.3 Vidro laminado	7
2.3 Sistemas de fixação	8
2.3.1 Sistemas de fixação com materiais adesivos	8
2.3.2 Sistemas de fixação mecânicos	9
2.4 Sistemas de controlo estrutural	12
2.4.1 Sistemas de controlo estrutural passivo	12
2.4.2 Sistemas de controlo estrutural activo	12
2.4.3 Sistemas de controlo estrutural semi-activo	13
2.4.4 Sistemas de controlo estrutural híbrido	14
3 Acção dinâmica do vento	15
3.1 Introdução	15
3.2 Velocidade média do vento	16
3.3 Turbulência do vento	18
3.3.1 Espectro de potência	18
3.3.2 Geração de perturbações	20
3.4 Pressão dinâmica	22

3.5	Coeficientes de pressão	23
3.5.1	Coeficientes de pressão exterior	23
3.5.2	Coeficientes de pressão interior	27
3.5.3	Coeficientes de pressão resultante	28
4	Modelação e optimização de sistemas de controlo	29
4.1	Introdução	29
4.2	Tipos de malha	29
4.2.1	Malha aberta	29
4.2.2	Malha Fechada	30
4.3	Acções de controlo	31
4.3.1	Acção de controlo proporcional	31
4.3.2	Acção de controlo integral	31
4.3.3	Acção de controlo derivativo	32
4.3.4	Acção de controlo proporcional-integral-derivativo	33
4.4	Sintonização de controladores	34
4.4.1	Primeiro método de Ziegler-Nichols	34
4.4.2	Segundo método de Ziegler-Nichols	36
4.4.3	The Good Gain Method	37
5	Exemplo de estudo	39
5.1	Introdução	39
5.2	Estrutura em estudo	39
5.3	Análise modal	41
5.4	Acção dinâmica do vento	48
5.5	Resposta da estrutura	52
5.5.1	Algoritmo para resolver a equação de movimento	56
5.5.2	Análise de resultados e verificação dos estados limites últimos	57
6	Implementação do sistema de controlo activo	65
6.1	Introdução	65
6.2	Definição do actuador	65
6.3	Algoritmo para a introdução do PID no cálculo numérico	67
6.4	Análise de resultados e verificação dos estados limites últimos	68
6.5	Sistema inactivo <i>versus</i> Sistema activo	75
6.5.1	Estrutura equivalente sem controlo estrutural	77
7	Conclusões e considerações finais	81
7.1	Apreciação global e conclusões	81
7.2	Perspectivas para aplicações e desenvolvimentos futuros	81
	Bibliografia	83
A	Normas de concepção e utilização do vidro	87
B	Catálogo de perfis IPE e HE	89
C	Catálogo de perfis tubulares Celsius 355	103

D	Catálogo de cabos de pré-esforço Bridon	113
E	Catálogo de vidro temperado Saint-Gobain Glass	119
F	Catálogo de sistemas de fixação FITECHNIC	131

Índice de Figuras

1.1	Exemplos das primeiras utilizações do vidro	1
1.2	Vista para o exterior de uma residência em Kojetim, República Checa [5]	2
2.1	Tensões na secção transversal de uma lâmina de vidro devido ao tratamento térmico . . .	6
2.2	Fracturas no vidro [47]	7
2.3	Composição de um vidro laminado [4]	8
2.4	Exemplo de ligação com silicone estrutural, Almada Fórum	9
2.5	Exemplo de sistema de fixação mecânico contínuo	9
2.6	Exemplo de fixação por ponto aparafusada, Almada Fórum	10
2.7	Exemplos de aranhas [9]	11
2.8	Aplicação de aranha [10]	11
2.9	Sistema com “feedforward control” (adaptada de [31])	13
2.10	Sistema com “feedback control” (adaptada de [31])	13
3.1	Exemplos de espectros de potência	20
3.2	Procedimento para criação de um sinal artificial [23]	22
3.3	Determinação do coeficiente de pressão exterior em função da superfície carregada A [16]	23
3.4	Altura de referência z_{pe} em função de h e b , e o perfil de pressão dinâmica correspondente (adaptada de [16])	24
3.5	Zonas em paredes verticais (adaptada de [16])	25
3.6	Zonas em cobertura em terraço (adaptada de [16])	26
3.7	Determinação do coeficiente de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas [16]	28
4.1	Sistema com malha aberta (adaptada de [31])	30
4.2	Sistema com malha fechada (adaptada de [31])	30
4.3	Erros e respectivas respostas do controlador nas acções de controlo proporcional e integral [31]	32
4.4	Erro e resposta do controlador com acção de controlo PD (adaptada de [31])	33
4.5	Erro e resposta do controlador com acção de controlo PID (adaptada de [31])	34
4.6	Resposta do sistema à acção de controlo [31]	34
4.7	Resposta do sistema à acção de controlo através do primeiro método de Z&N (adaptada de [31])	35
4.8	Determinação das constantes L e T do primeiro método de Z&N (adaptada de [31]) . . .	35
4.9	Oscilações harmónicas sustentadas e respectivo período crítico, P_{cr} , correspondente ao segundo método de Z&N [31]	36
4.10	Determinação do tempo entre a resposta superior e inferior (adaptada de [31])	37

5.1	Edifício em estudo	40
5.2	Configuração dos cabos horizontais	40
5.3	Corte estrutural	41
5.4	Modelo da estrutura em SAP2000	42
5.5	Primeiro modo de vibração fundamental	43
5.6	Segundo modo de vibração fundamental	43
5.7	Terceiro modo de vibração fundamental	44
5.8	Hipóteses consideradas no modelo bidimensional	45
5.9	Área de influência para massas concentradas	45
5.10	Modos de vibração no modelo bidimensional	46
5.11	Espectro de potência	49
5.12	Geração da turbulência para um período de dez segundos	50
5.13	Velocidade do vento para um período de dez segundos	51
5.14	Configurações deformadas da estrutura (escala 10:1)	58
5.15	Distribuição de esforços axiais	59
5.16	Aplicação de pré-tensão e distribuição de esforços axiais com pré-tensão aplicada	60
5.17	Esforços actuantes no perfil IPE - Caso de pressão	61
5.18	Esforços actuantes no perfil IPE - Caso de sucção	62
6.1	Configurações deformadas da estrutura com sistema de controlo activo (escala 10:1)	70
6.2	Tensão instalada nos cabos devido à acção de controlo - Pressão	71
6.3	Tensão instalada nos cabos devido à acção de controlo - Sucção	71
6.4	Distribuição de esforços axiais, sem pré-tensão, com sistema de controlo activo	72
6.5	Distribuição de esforços axiais, com pré-tensão, com sistema de controlo activo	73
6.6	Esforços actuantes no perfil IPE com sistema de controlo activo - Caso de pressão	74
6.7	Esforços actuantes no perfil IPE com sistema de controlo activo - Caso de sucção	75
6.8	Deslocamentos no grau de liberdade u_2 para o caso de pressão	76
6.9	Deslocamentos no grau de liberdade u_2 para o caso de sucção	77
6.10	Configurações deformadas da estrutura composta por perfis HEB 260 (escala 10:1)	79

Índice de Tabelas

3.1	Valor básico da velocidade de referência do vento [16]	16
3.2	Categorias de terreno e respectivos parâmetros [16]	17
3.3	Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [16]	25
3.4	Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas com bordos em aresta viva [16]	26
4.1	Valores de K_p , T_i e T_d (Primeiro método de Z&N) [31]	35
4.2	Valores de K_p , T_i e T_d (Segundo método de Z&N) [31]	36
4.3	Valores de K_p , T_i e T_d (TGGM) [24]	38
5.1	Características dos elementos estruturais	42
5.2	Características do vidro	42
5.3	Frequências próprias de vibração	44
5.4	Frequências próprias de vibração dos modelos considerados	46
5.5	Parâmetros para o cálculo de $v_m(z)$	48
5.6	Parâmetros para o cálculo do espectro de potência	49
5.7	Coeficientes de pressão exterior	51
5.8	Coeficientes de pressão interior	51
5.9	Coeficientes de pressão resultante	51
5.10	Parâmetros de integração numérica com amortecimento	53
5.11	Parâmetros de integração numérica sem amortecimento	54
5.12	Coeficientes parciais relativos	56
5.13	Deslocamentos máximos em u_2 [cm]	57
5.14	Deslocamentos máximos médios em u_2 [cm]	57
5.15	Esforços axiais máximos [kN]	58
5.16	Esforços axiais máximos após pré-tensão [kN]	60
5.17	Esforços máximos actuantes	62
5.18	Esforços resistentes	62
6.1	Valores de K_{cr} , P_{cr} , K_p , T_i e T_d obtidos	68
6.2	Deslocamentos máximos em u_2 com sistema de controlo activo [cm]	69
6.3	Deslocamentos médios em u_2 com sistema de controlo activo [cm]	69
6.4	Tensão máxima instalada nos cabos [kN]	71
6.5	Esforços axiais máximos com sistema de controlo activo [kN]	72
6.6	Esforços axiais máximos, com pré-tensão, com sistema de controlo activo [kN]	73
6.7	Esforços máximos actuantes com sistema de controlo activo	75

6.8	Comparação de resultados no caso de pressão	76
6.9	Comparação de resultados no caso de sucção	77
6.10	Deslocamentos máximos em u_2 para estrutura com perfil HEB 260 [cm]	78
6.11	Deslocamentos médios em u_2 para estrutura com perfil HEB 260 [cm]	78
6.12	Deslocamentos médios em u_2 para os diferentes casos estudados [cm]	79
A.1	Principais normas de concepção e utilização do vidro [47]	87

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas

AMD	Amortecedores de Massa Activa
CEN	Comité Europeu de Normalização
EC0	Eurocódigo 0
EC1	Eurocódigo 1
EC3	Eurocódigo 3
ELU	Estado Limite Último
EN	Norma Europeia
HMD	Amortecedores de Massa Híbrida
PVB	Polivinil Butiral
SGG	Saint-Gobain Glass
TGGM	The Good Gain Method
TMD	Amortecedores de Massa Sintonizada

Siglas

MA	Sistemas de controlo com malha aberta
MF	Sistemas de controlo com malha fechada
GDL	Graus de liberdade
OPS	Pré-esforço orgânico
P	Acção de controlo proporcional
PD	Acção de controlo proporcional-derivativo
PI	Acção de controlo proporcional-integral
PID	Acção de controlo proporcional-integral-derivativo
Z&N	J.G. Ziegler e N.B. Nichols

Símbolos

A	Área sujeita ao vento; Área transversal de uma secção
A_k	Constante de geração de perturbações
C	Matriz de amortecimento
E	Módulo de elasticidade
E_d	Acção de dimensionamento
$E[\bar{v}^2(t)]$	Valor esperado do quadrado da variável $\bar{v}(t)$
$\mathbf{F}(t)$	Vector de forças generalizadas
G_k	Acção permanente
I	Inércia
K	Matriz de rigidez
\mathbf{K}	Matriz de rigidez generalizada
K_{cr}	Ganho proporcional crítico
K_d	Ganho derivativo
K_i	Ganho integral
K_p	Ganho proporcional
K_{pGG}	Ganho proporcional crítico para o TGGM
L	Tempo de atraso
$L(z)$	Escala de turbulência
$L_{1u}(z)$	Escala de turbulência de Kaimal
$L_{2u}(z)$	Escala de turbulência de von Karman
L_t	Escala de referência
M	Matriz de massa
\mathbf{M}	Matriz de massa generalizada
P_{cr}	Período crítico
Q_k	Acção variável
$S_L(z, n)$	Função de densidade espectral de potência
$S_L(\omega)$	Função de densidade espectral de potência
T	Constante temporal

T_{cr}	Tensão crítica do cabo
T_d	Tempo de derivação
T_i	Tempo de integração
T_{max}	Tensão máxima instalada no cabo
T_{ou}	Tempo entre as respostas superior e inferior, à resposta em estado estacionário, no TGGM
W	Força concentrada do vento
b	Largura da fachada do edifício onde incide o vento
$c(t)$	Resposta do sistema
c_{dir}	Coeficiente de direcção
$c_o(z)$	Coeficiente de orografia
c_{pe}	Coeficiente de pressão exterior
$c_{pe,1}$	Coeficiente de pressão exterior local
$c_{pe,10}$	Coeficiente de pressão exterior global
c_{pi}	Coeficiente de pressão interior
$c_{p,net}$	Coeficiente de pressão resultante
$c_r(z)$	Coeficiente de rugosidade
c_{season}	Coeficiente de sazão
d	Largura da fachada do edifício perpendicular à fachada de incidência do vento
e	Largura da fachada para definição de zonas
$e(t)$	Erro do sistema
f	Frequência, expressa em Hz
$f_L(z, n)$	Frequência adimensional
h	Altura total do edifício
h_{strip}	Altura de uma faixa no edifício
k_r	Coeficiente de terreno
\hat{k}_{tt}	Matriz de rigidez condensada
m	Massa concentrada
m_{tt}	Matriz de massa condensada
n	Frequência, expressa em Hz

$p(t)$	Excitação
$q(t)$	Coordenada modal
$q_p(z)$	Pressão dinâmica do vento
t	Tempo; Espessura do vidro
t_i	Instante i
$u(t)$	Resposta do controlador; Deslocamento
u_0	Deslocamento inicial
\dot{u}_0	Velocidade inicial
v	Velocidade do vento
v_b	Velocidade de referência do vento
$v_{b,0}$	Velocidade básica de referência do vento
v_m	Velocidade média do vento
\bar{v}	Turbulência do vento
w	Pressão total do vento
w_e	Pressão exterior do vento
w_i	Pressão interior do vento
z	Altura acima do solo
z_0	Comprimento de rugosidade
$z_{0,II}$	Comprimento de rugosidade de terreno de categoria II
z_i	Altura de referência de von Karman
z_{\max}	Altura máxima
z_{\min}	Altura mínima
z_{pe}	Altura de referência para a pressão exterior
z_{pi}	Altura de referência para a pressão interior
z_{strip}	Altura total das faixas no edifício
z_t	Altura de referência
α	Constante de turbulência; Parâmetro da matriz de amortecimento; Ângulo
β	Parâmetro da matriz de amortecimento; Ângulo
γ_G	Coefficiente parcial relativo

γ_Q	Coeficiente parcial relativo
Δ	Variação
Δn	Largura de banda, expressa em Hz
$\Delta\omega$	Largura de banda, expressa em rad/s
Δt	Intervalo de tempo, em s
ζ	Coeficiente de amortecimento
μ	Índice de aberturas
ρ	Massa volúmica, expressa em kg/m ³
τ	Variável de integração
Φ	Matriz modal
ϕ	Modo de vibração
ϕ_k	Ângulo de fase, expresso em rad
Ω^2	Matriz espectral
ω	Frequência, expressa em rad/s
ω_D	Frequência amortecida, expressa em rad/s

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

O vidro, um dos mais antigos materiais produzidos pelo homem, começou, essencialmente, por ser utilizado na criação de pequenos objectos artísticos e decorativos (*cf.* Figura 1.1(a)). A utilização do vidro passou também a abranger a criação de janelas, devido à necessidade de entrada de luz nos edifícios e, simultaneamente, oferecer protecção relativamente às perturbações atmosféricas, como evidencia a Figura 1.1(b).



(a) Exemplos de objectos decorativos em vidro [2]



(b) Igreja de Nossa Senhora dos Olivais, Tomar [3]

Figura 1.1: Exemplos das primeiras utilizações do vidro

Assim que a possibilidade de obter uma vista para o exterior começou a ser valorizada, o vidro passou a ser um material necessário na composição arquitectónica (*cf.* Figura 1.2). Na actualidade, a elevada utilização do vidro está associada não só à luminosidade e transparência alcançadas, como também aos contínuos melhoramentos tecnológicos ao nível da produção e qualidade, no que diz respeito ao desempenho das estruturas de vidro, à eficácia e eficiência da sua aplicação e, recentemente, às melhorias no que toca ao conforto térmico e acústico. Todos estes factores tornam o vidro num material preponderante nas formas da arquitectura e engenharia contemporâneas.



Figura 1.2: Vista para o exterior de uma residência em Kojetim, República Checa [5]

Com o conceito de transparência a ser cada vez mais utilizado pela arquitectura, o engenheiro tem o papel de, no que diz respeito ao desempenho estrutural, criar soluções que tirem o melhor partido das características do vidro, surgindo o conceito de *vidro estrutural*. Este conceito permite eliminar a caixilharia tradicional, sendo possível optar por sistemas de suporte mais discretos, tornando a estrutura mais leve, transparente e elegante.

Outro factor que contribui para a crescente utilização no vidro estrutural é o avanço da tecnologia, que tem permitido a criação de estruturas cada vez mais transparentes, com uma consequente redução dos custos associados aos materiais utilizados no sistema de suporte estrutural.

Apesar destes progressos, o vidro estrutural tem tido alguma dificuldade em ser aceite pela maioria dos engenheiros e arquitectos, devido, essencialmente, ao seu elevado custo, à complexidade associada ao seu dimensionamento e à falta de confiança no mesmo, devido ao seu comportamento frágil.

1.2 Objectivos e metodologia

O cerne desta dissertação está relacionado com a criação de estruturas inteligentes, devido à aplicação de um sistema de controlo activo no seu dimensionamento. Por conseguinte, definem-se os seguintes objectivos:

- Análise e posterior redução dos efeitos consequentes das solicitações associadas ao vento a que as estruturas com fachadas de vidro se encontram sujeitas, através da introdução de um sistema de controlo activo.

- Redução das dimensões da estrutura portante da fachada com o objectivo de aumentar a sua transparência e obter uma diminuição de custos.

O caso em estudo é um edifício com uma fachada de vidro, cujas deformações provocadas pela acção do vento na fachada serão controladas através de um sistema de cabos de pré-esforço activo [32].

Define-se, então, a seguinte metodologia de trabalho:

- Análise e caracterização modal da estrutura;
- Determinação da acção dinâmica do vento segundo o EC1-4;
- Cálculo das deformações associadas à acção do vento através de integração numérica;
- Controlo das deformações através da introdução de pré-esforço activo na estrutura.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, sendo o seu conteúdo sucintamente descrito em seguida.

Neste primeiro capítulo, para além dos objectivos deste trabalho, é referida a importância do vidro, bem como a necessidade de ajustar o tipo de estruturas às inovações arquitectónicas.

O segundo capítulo tem como objectivo o enquadramento teórico necessário para uma melhor compreensão do tipo de estruturas analisado, assim como dos sistemas de controlo existentes. São ainda referidos estudos e respectivos desenvolvimentos de outros autores, utilizados como base para o desenvolvimento desta dissertação.

Sendo o vento uma das principais acções dinâmicas a que as fachadas se encontram expostas, a sua definição torna-se um ponto fulcral no decorrer deste trabalho. Deste modo, o terceiro capítulo insere-se na determinação da acção dinâmica do vento segundo o EC1-4 [16].

O quarto capítulo expõe os diversos tipos de controladores existentes, assim como a sintonização dos mesmos, baseada nas regras de Ziegler-Nichols e no TGGM [24, 31, 48].

No quinto capítulo é efectuado o estudo de uma fachada de vidro exposta à acção dinâmica do vento, sendo analisados os respectivos deslocamentos e dimensionada para a acção a que está sujeita [15, 17, 18].

No sexto capítulo é então estudado e aplicado um sistema de controlo estrutural na estrutura, através de um sistema de cabos de pré-esforço activo, de forma a minorar os deslocamentos inerentes à acção do vento [31, 32].

Por último, no sétimo capítulo, são apresentadas as conclusões mais relevantes deste trabalho e propõem-se aplicações e desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

Esta dissertação é baseada no estudo de um sistema de controlo numa fachada de vidro estrutural. Para um melhor enquadramento do tema, será feita uma introdução onde são expostos os tipos de vidro mais utilizados na actualidade, os diferentes sistemas de fixação possíveis bem como os diferentes tipos de sistema de controlo geralmente utilizados.

2.2 Tipos de vidro

Devido à sua composição química e aos tratamentos a que é sujeito, a variedade de vidros existente é enorme. Porém, só uma pequena gama pode ser utilizada como elemento estrutural, devido à resistência mecânica necessária para garantir a estabilidade e segurança das estruturas.

A norma base para a utilização do vidro é a EN 572-1: 2004, referida no Anexo A.

2.2.1 Vidro *float*

O vidro *float* é a base para todos os restantes vidros planos, sendo o vidro ideal quando se exige perfeita visibilidade, uma vez que não apresenta distorção óptica e possui alta transmissão de luz [47].

O seu processo de fabrico, desenvolvido pela Pilkington nos anos 50, possibilitou a utilização do vidro em grande escala, ao reduzir drasticamente o seu custo. Ao provocar um impacto enorme na arquitectura, permitiu o desenvolvimento de soluções revolucionários a nível estrutural [47].

O processo *float*, como o próprio nome sugere, consiste em fazer flutuar, à saída do forno, uma lâmina de vidro fundida a aproximadamente 1600 °C sobre um banho de estanho líquido. Posteriormente, a lâmina de vidro é encaminhada para um túnel de arrefecimento no qual a temperatura do vidro baixa gradualmente até aos 250 °C. Em seguida, a lâmina segue ao ar livre e procede-se à sua maquinação, que inclui o corte, a furação e o tratamento das superfícies e arestas. Este procedimento é efectuado antes de qualquer melhoramento das suas propriedades mecânicas [47].

A norma para a utilização do vidro é a EN 572-2: 2004, referida no Anexo A.

2.2.2 Vidro temperado

Por outro lado, tem-se o vidro temperado. Este tipo de vidro é sujeito a um tratamento térmico, designado de *têmpera*, para alterar as suas características mecânicas. Este tratamento tem como base o aquecimento do vidro a uma temperatura superior à sua temperatura de transformação, sendo então submetido a um rápido arrefecimento através de um fluxo de ar em ambas as superfícies [47]. Esta repentina mudança de temperatura gera um estado de tensão interno autoequilibrado (estado de coacção) com um perfil parabólico ao longo da secção transversal do vidro, surgindo tensões de compressão nas superfícies e tensões de tracção no interior do vidro, como ilustra a Figura 2.1.

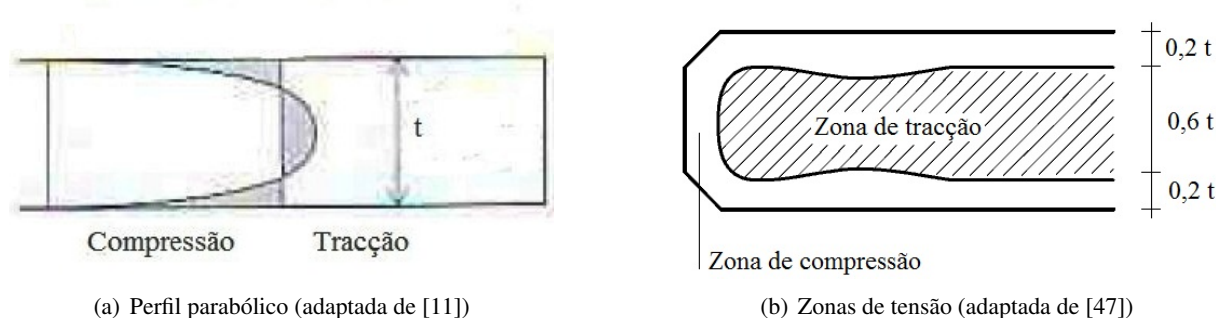
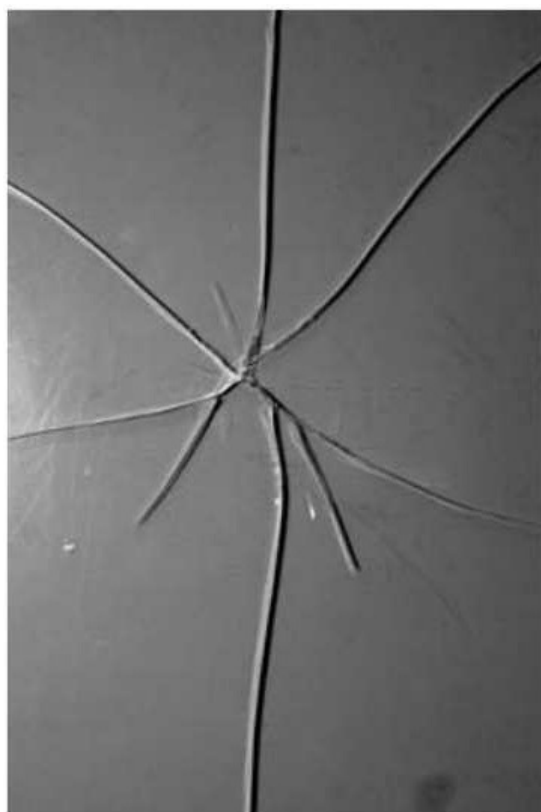
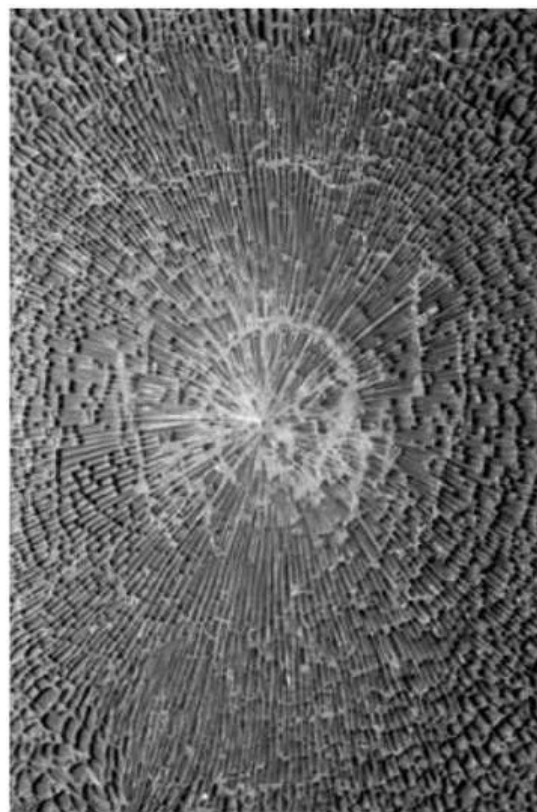


Figura 2.1: Tensões na secção transversal de uma lâmina de vidro devido ao tratamento térmico

As tensões de compressão têm como objectivo, ao corrigir as fissuras provenientes de defeitos superficiais, a redução do perigo desses mesmos defeitos no que respeita à resistência do vidro. Por sua vez, a resistência ao choque térmico, ou seja, a resistência a bruscas variações de temperatura, também é melhorada.

A têmpera influencia também o comportamento do vidro no que toca à sua fractura, na medida em que a energia acumulada no vidro define o padrão associado à fractura do mesmo. No caso do vidro temperado, este tem uma quantidade de energia acumulada superior ao vidro *float*, o que causa a quebra do vidro em fragmentos muito mais pequenos, como demonstra a Figura 2.2. Estes fragmentos não possuem arestas afiadas e, por isso, o vidro temperado também pode ser designado por *vidro de segurança*.

As normas que estabelecem os requisitos para a utilização do vidro temperado são a EN 1863 e a EN 12150, referidas no Anexo A.

(a) Fractura no vidro *float*

(b) Fractura no vidro temperado

Figura 2.2: Fracturas no vidro [47]

2.2.3 Vidro laminado

O vidro laminado é um outro tipo de *vidro de segurança*, uma vez que mantém os estilhaços unidos quando quebrado. Sendo composto por, no mínimo, duas lâminas de vidro, este facto deve-se às camadas intermédias compostas por uma película transparente e flexível, habitualmente de polivinil butiral, PVB, como ilustra a Figura 2.3 [47].

Geralmente este tipo de vidro é utilizado quando existe a possibilidade de acidentes com impacto na vida humana, tais como pára-brisas de automóveis, janelas, vitrines ou locais onde não pode cair o vidro que se quebra, como é o caso das clarabóias. Devido à existência do PVB, há um efeito de amortecimento entre lâminas, o que confere um melhor isolamento acústico a este tipo de vidro [7].

Essencialmente este vidro passa, depois de colocadas as películas entre as lâminas, por um processo de aquecimento e compressão, com o objectivo de fundir a película de PVB e eliminar o ar existente entre esta e as lâminas. Seguidamente, o vidro é conduzido para uma estufa para garantir a aderência total entre as lâminas e o PVB [47].

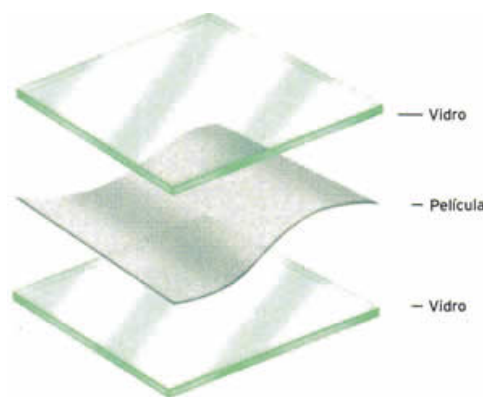


Figura 2.3: Composição de um vidro laminado [4]

A norma que estabelece os requisitos para a utilização do vidro laminado é a ISO 12543, referida no Anexo A.

2.3 Sistemas de fixação

Com o avanço da tecnologia e da arquitectura, a criação de edifícios totalmente transparentes é cada vez mais utilizada na actualidade. Para tal, o uso de sistemas de fixação adequados para este tipo de estruturas permite a dispensa dos caixilhos tradicionais, ao mesmo tempo que transmite os esforços provenientes do vidro para a estrutura portante [28]. Estes sistemas, podem ser classificados como sistemas de fixação com materiais adesivos ou sistemas de fixação mecânicos, existindo a possibilidade de serem utilizados em simultâneo [47].

2.3.1 Sistemas de fixação com materiais adesivos

O sistema de fixação com materiais adesivos permite a ligação entre o vidro e a estrutura portante através de materiais adesivos ou silicones estruturais. As tensões neste tipo de ligação são transmitidas uniformemente ao longo de toda a superfície de contacto entre o vidro e a estrutura portante. Além disso, a constituição deste sistema permite obter uma superfície plana e de fácil limpeza [34].

Utilizado para criar uma vedação entre os painéis de vidro e a estrutura portante, o que permite garantir a estanqueidade da estrutura (*cf.* Figura 2.4), o silicone estrutural possui uma elevada elasticidade, o que permite acomodar deformações diferenciais. Para um correcto funcionamento da ligação, é necessário analisar a compatibilidade química entre o silicone e os componentes da estrutura com a qual estará em permanente contacto [28].

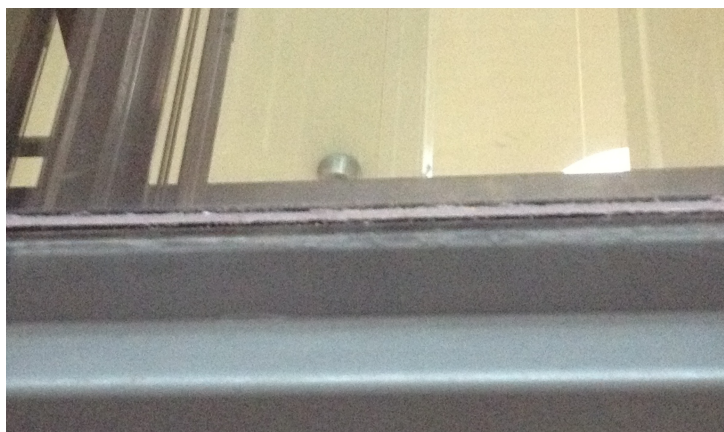


Figura 2.4: Exemplo de ligação com silicone estrutural, Almada Fórum

No caso de serem utilizados materiais adesivos para a ligação, estes possuem uma maior rigidez, possibilitando a diminuição das dimensões das juntas. A elevada rigidez conduz a uma concentração de esforços, o que requer uma maior preocupação no controlo de tensões nos pontos singulares. Isto leva a que este sistema não seja muito utilizado na construção [34].

2.3.2 Sistemas de fixação mecânicos

O sistema de fixação mecânico é o tipo mais utilizado na actualidade devido às suas propriedades mecânicas, conferidas pelo aço. Subdividido em duas categorias, encontra-se nas mais variadas construções de vidro, sendo geralmente utilizado em simultâneo com o silicone estrutural.

Como primeira abordagem, os sistemas de fixação mecânicos contínuos consistem no suporte do vidro ao longo do seu perímetro, com recurso a caixilharias (*cf.* Figura 2.5(a)). A título de exemplo, tem-se a fachada cortina (*cf.* Figura 2.5(b)) em que esforços são transmitidos à estrutura portante através de uma estrutura auxiliar localizada nos caixilhos.



(a) Esquema da caixilharia [6]



(b) Exemplo de fachada [8]

Figura 2.5: Exemplo de sistema de fixação mecânico contínuo

Relativamente ao sistema contínuo, o sistema de fixação mecânico por ponto apresenta a desvantagem de exigir a perfuração dos painéis de vidro, o que torna a escolha do vidro a utilizar relevante. No entanto, tem como vantagem uma menor área de contacto com o vidro, tornando a fachada mais transparente. Como exemplo é apresentada a fixação por ponto aparafusada, que consiste no suporte pontual do vidro e na transmissão dos esforços devidos às acções que atingem a fachada, para a estrutura portante. Este tipo de fixação encontra-se associado à fachada de vidro exterior agrafado, como mostra a Figura 2.6.



Figura 2.6: Exemplo de fixação por ponto aparafusada, Almada Fórum

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de sistema de suporte. Este tipo de sistema, constituído por vários elementos, permite a distribuição das tensões que se concentram em torno do furo. Cada elemento do sistema de suporte tem uma função, de modo a assegurar, simultaneamente, rigidez e flexibilidade ao sistema. A rigidez garante que não ocorram deslocamentos excessivos; a flexibilidade, conferida por rótulas, anula a transferência de momentos do vidro para a estrutura. Por outro lado, os elementos devem, também, ser suficientemente resistentes, de forma a garantir a transferência de cargas para a estrutura portante.

Geralmente composto por parafusos e um sistema de suporte do vidro para transmissão das cargas para a estrutura portante, o sistema de fixação por ponto é o mais utilizado na actualidade [34]. Com várias opções para sistema de suporte, a mais utilizada é a *aranha*, que pode ser composta por um, dois, três ou quatro braços (*cf.* Figura 2.7), em que o vidro é aparafusado na extremidade dos braços e o suporte ligado à estrutura portante (*cf.* Figura 2.8).



(a) Aranha com quatro braços



(b) Aranha com três braços



(c) Aranha com dois braços



(d) Aranha com um braço

Figura 2.7: Exemplos de aranhas [9]

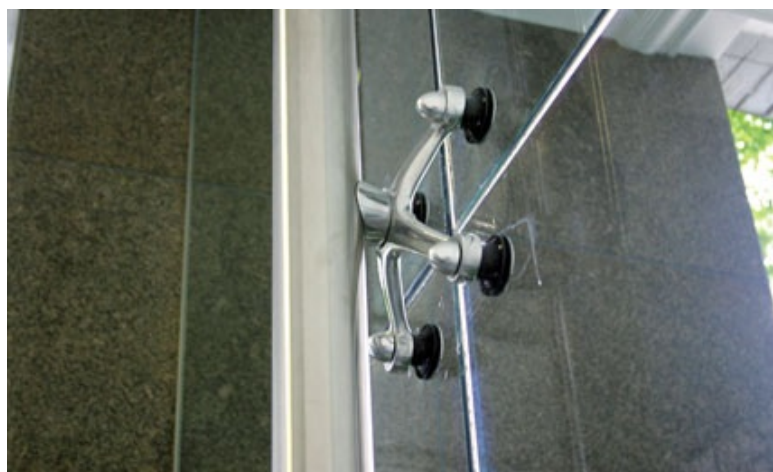


Figura 2.8: Aplicação de aranha [10]

2.4 Sistemas de controlo estrutural

Como referido no Capítulo 1, o avanço da tecnologia permitiu a criação de sistemas de controlo capazes de mitigar as consequências de acções dinâmicas que afectam as estruturas [13, 25, 44, 45]. Com um elevado número de casos de aplicação e de propostas de utilização, num trabalho desta dimensão será apenas efectuado um pequeno resumo dos sistemas conhecidos.

2.4.1 Sistemas de controlo estrutural passivo

Devido ao seu reduzido custo e alta fiabilidade, uma vez que não é necessário o fornecimento de energia externa para o seu funcionamento, os sistemas de controlo estrutural passivo são os mais utilizados. No entanto, têm a desvantagem de só poderem ser utilizados em situações onde a acção a controlar seja conhecida ou possa ser estimada, e em situações em que as características dinâmicas da estrutura não sejam alteradas de forma significativa durante a ocorrência da acção [39, 42].

Este tipo de controlo encontra-se dividido em três categorias [29]:

- Absorvedores - Dispositivos compostos por uma massa ligada à estrutura através de uma mola e um amortecedor. Devidamente sintonizados para a situação a controlar (sintonizados para a frequência de vibração da estrutura), introduzem uma compensação no movimento da estrutura principal, o que reduz o seu comportamento dinâmico através da absorção de energia mecânica pela massa do dispositivo;
- Dissipadores - Dispositivos que contribuem para a dissipação da energia mecânica recebida pelas acções dinâmicas. Uma boa solução quando aplicados em zonas críticas devidamente seleccionadas, tem como desvantagem a necessidade de a estrutura ser afectada pela acção dinâmica para entrarem em funcionamento;
- Isoladores - Dispositivos de baixa rigidez lateral, têm como objectivo tornar o movimento horizontal da estrutura independente do movimento do terreno na mesma direcção, o que torna o funcionamento da estrutura como um corpo rígido independente da fundação.

2.4.2 Sistemas de controlo estrutural activo

Ao contrário dos sistemas de controlo estrutural passivo, os sistemas de controlo activo necessitam de energia externa, representando elevados custos para o seu funcionamento. No entanto, a sua elevada eficiência torna-se particularmente interessante em estruturas que apresentem uma dinâmica onde vários modos de vibração contribuam de forma significativa para a resposta estrutural ou quando as características modais são muito instáveis ao longo do tempo [26, 29, 42].

Com recurso a sensores, estes sistemas utilizam uma unidade da resposta estrutural para processar o algoritmo de controlo e, através de um actuador, introduzem as forças de controlo na estrutura.

O controlo pode ser efectuado de duas formas. A primeira consiste num controlo antes da resposta estrutural, designada “feedforward control”, que é activada antes da excitação ocorrer, como mostra a Figura 2.9. É geralmente utilizada para acções cujo comportamento é conhecido. A segunda, denominada “feedback control”, consiste num controlo depois da excitação acontecer e existir uma resposta estrutural, sendo notória a sua vantagem para acções aleatórias com um comportamento indefinido, como ilustra a Figura 2.10.

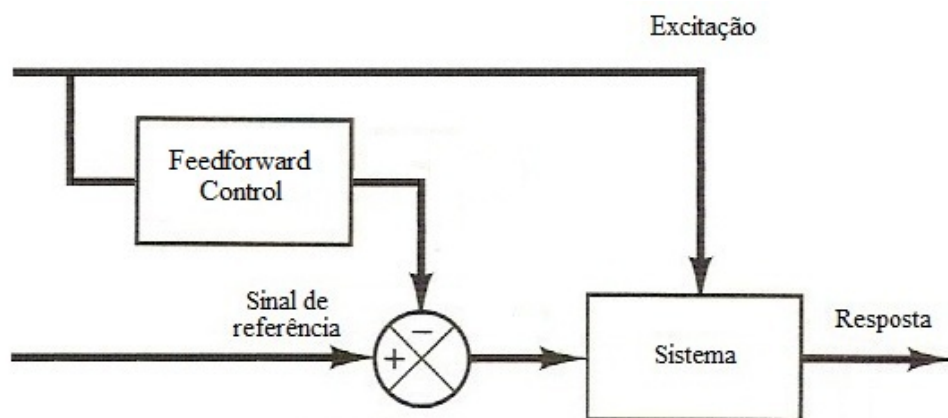


Figura 2.9: Sistema com “feedforward control” (adaptada de [31])

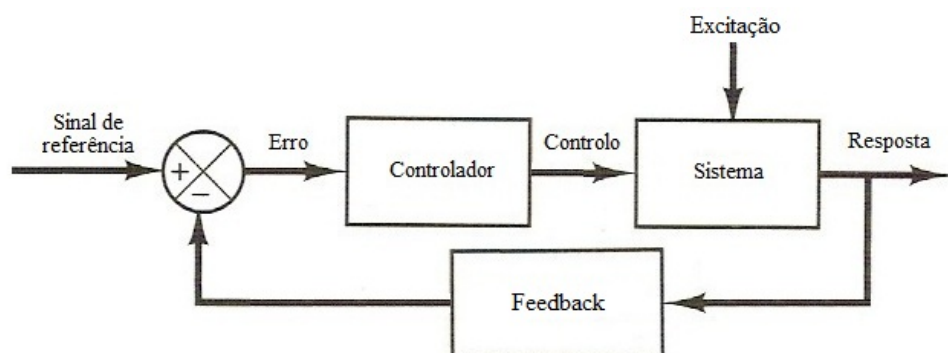


Figura 2.10: Sistema com “feedback control” (adaptada de [31])

A vantagem destes sistemas é a sua enorme adaptabilidade às excitações a que as estruturas estão sujeitas.

2.4.3 Sistemas de controlo estrutural semi-activo

Actualmente em grande desenvolvimento, os sistemas de controlo estrutural semi-activo utilizam as vantagens de ambos os sistemas referidos acima [20, 29, 46].

Relativamente aos sistemas activos, um sistema semi-activo utiliza igualmente um algoritmo de controlo, com a diferença de não introduzir energia mecânica na estrutura. Utiliza antes uma fonte de energia de

baixa potência para variar as suas características dinâmicas localmente, o que reduz consideravelmente os custos associados. Desta forma, o sistema não fica menos condicionado por eventuais faltas de energia.

Em caso de falha da fonte de energia utilizada, os sistemas semi-activos comportam-se como sistemas passivos, uma vez que utilizam o efeito da dissipação de energia como medida de controlo.

2.4.4 Sistemas de controlo estrutural híbrido

Por último, têm-se os sistemas de controlo estrutural híbrido que resultam da combinação entre, pelo menos, dois dos sistemas de controlo existentes. O caso mais comum dos sistemas de controlo híbrido são os amortecedores de massa híbrida (HMD), resultantes da combinação de um sistema de controlo passivo composto por amortecedores de massa sintonizada (TMD) com um sistema de controlo activo composto por amortecedores de massa activa (AMD) [40]. Com esta combinação, o efeito desejado é o aumento do desempenho do sistema passivo, através do algoritmo de controlo inerente ao sistema activo [29, 43].

Com uma exigência muito menor do sistema activo em relação à sua utilização isolada, o custo directo associado ao sistema híbrido sofre uma redução bastante significativa [35].

Capítulo 3

Acção dinâmica do vento

3.1 Introdução

Para uma melhor análise do comportamento das estruturas quando sujeitas a solicitações, é necessária uma boa definição dessas mesmas solicitações. Como tal, este capítulo incide sobre a caracterização da solicitação em estudo neste trabalho - o vento.

A acção do vento é definida através do valor da sua velocidade, v , dada por:

$$v = v_m + \bar{v} \quad (3.1)$$

onde:

v_m representa a velocidade média;

\bar{v} representa a velocidade associada às perturbações, também designada por turbulência.

Na secção 3.2 é demonstrado todo o procedimento necessário para o cálculo da velocidade média do vento, v_m , segundo o EC1-4 [16].

Por sua vez, na secção 3.3, é tratada a parcela da velocidade do vento correspondente à turbulência, \bar{v} , ou seja, às variações do valor médio da velocidade. São criados vários espectros de potência, designadamente o espectro preconizado no EC1-4, o espectro de von Karman e o espectro de Kaimal, utilizados posteriormente para a geração das perturbações da velocidade do vento ao longo do tempo [12, 16].

Na secção 3.4 é determinada a pressão dinâmica proveniente da acção do vento, segundo o EC1-4 [16].

Na secção 3.5 são determinados os diferentes coeficientes de pressão associados aos diferentes tipos de estrutura, segundo o EC1-4, tendo em conta a direcção do vento [16].

Por fim, na secção 3.6, é determinada a pressão total exercida pelo vento nas estruturas.

3.2 Velocidade média do vento

Segundo o EC1-4, a velocidade média do vento é determinada a partir do valor de referência da velocidade do vento, v_b , que depende do regime local dos ventos e da variação do vento em função da altura, determinada através da rugosidade do terreno e da orografia [16].

Para tal, o valor de referência da velocidade do vento deve ser calculado através da expressão:

$$v_b = c_{\text{dir}} c_{\text{season}} v_{b,0} \quad (3.2)$$

onde:

v_b é o valor de referência da velocidade do vento, definido em função da direcção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima da superfície de um terreno da categoria II;

$v_{b,0}$ é o valor básico da velocidade de referência do vento definido na Tabela 3.1;

c_{dir} é o coeficiente de direcção, influenciado pela direcção actuante do vento. O processo de determinação do seu valor encontra-se no Anexo Nacional do EC1-4. O valor recomendado é 1,0;

c_{season} é o coeficiente de sazão, influenciado pela época do ano à qual a estrutura se encontra exposta. O seu valor encontra-se definido no Anexo Nacional do EC1-4, sendo o valor recomendado de 1,0.

Tabela 3.1: Valor básico da velocidade de referência do vento [16]

Zona	$v_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

onde:

Zona A corresponde à generalidade do território, excepto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B corresponde aos arquipélagos dos Açores e da Madeira, bem como as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.

Como referido, a velocidade média do vento encontra-se dependente de uma altura z acima do solo, da rugosidade do terreno, da orografia e do valor de referência da velocidade do vento. É, assim, determinada através da expressão:

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) v_b \quad (3.3)$$

onde:

$c_r(z)$ é o coeficiente de rugosidade, definido em (3.4);

$c_o(z)$ é o coeficiente de orografia, relacionado com o relevo do terreno. O cálculo encontra-se definido no Anexo Nacional do EC1-4, sendo o valor recomendado igual a 1,0.

O coeficiente de rugosidade, dependente da altura z acima do solo, é dado pela expressão:

$$\begin{aligned} c_r(z) &= k_r \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) & \text{se } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \\ c_r(z) &= c_r(z_{\min}) & \text{se } z \leq z_{\min} \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde:

z_0 é o comprimento de rugosidade;

z_{\min} é a altura mínima definida na Tabela 3.2;

z_{\max} é a altura máxima, a considerar igual a 200 m;

k_r é o coeficiente de terreno, dependente de z_0 , calculado através de:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (3.5)$$

em que:

$z_{0,II}$ toma o valor de 0,05 m (categoria de terreno II, ver Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Categorias de terreno e respectivos parâmetros [16]

	Categoria de terreno	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	Zona costeira exposta aos ventos de mar	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	15

3.3 Turbulência do vento

É habitual considerar que a turbulência pode ser representada por um processo estocástico, estacionário e gaussiano, com recurso à densidade espectral de potência dada pela função $S_L(z, n)$ [23].

3.3.1 Espectro de potência

A função de densidade espectral de potência, de agora em diante denominada espectro de potência, pode ser interpretada como uma medida do conteúdo energético do processo. Da definição de espectro de potência, resulta a seguinte relação:

$$E[\bar{v}^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_L(\omega) d\omega \quad (3.6)$$

onde:

$E[\bar{v}^2(t)]$ é o valor esperado do quadrado da variável $\bar{v}(t)$;

$S_L(\omega)$ é o valor do espectro de potência, em função da frequência, ω , expressa em rad/s.

Entre as várias propostas existentes para o cálculo do espectro de potência, são abordadas as hipóteses fornecidas pelo EC1-4 (indicado para situações de turbulência atmosférica), por von Karman (indicado para túneis de vento) e por Kaimal (indicado, assim como o EC1-4, para situações de turbulência atmosférica) [12, 16].

Segundo o EC1-4, o espectro de potência pode ser calculado através da expressão [16]:

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 f_L(z, n)}{(1 + 10,2 f_L(z, n))^{5/3}} \quad (3.7)$$

onde:

$f_L(z, n)$ é a frequência adimensional determinada pela frequência natural da estrutura, n , expressa em Hz, através da expressão:

$$f_L(z, n) = \frac{n L(z)}{v_m(z)} \quad (3.8)$$

onde:

$L(z)$ é a escala de turbulência, que representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural. Para alturas z inferiores a 200 m, pode ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
L(z) &= L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha & \text{se } z \geq z_{\min} \\
L(z) &= L(z_{\min}) & \text{se } z < z_{\min}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

onde:

L_t é a escala de referência, cujo valor de 300 m;

z_t é a altura de referência, cujo valor de 200 m;

α é uma constante de turbulência, dada pela expressão:

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0) \tag{3.10}$$

O espectro de potência definido por von Karman, pode ser determinado pela expressão [12]:

$$S_L(z, n) = \frac{4 n L_{2u}(z)/v_m(z)}{(1 + 70,8(n L_{2u}(z)/v_m(z))^2)^{5/6}} \tag{3.11}$$

onde:

$L_{2u}(z)$ é a escala de turbulência de von Karman, cuja expressão é:

$$\begin{aligned}
L_{2u}(z) &= 280 (z/z_i)^{0,35} & \text{se } z < z_i \\
L_{2u}(z) &= 280 & \text{se } z > z_i
\end{aligned} \tag{3.12}$$

onde:

z_i é a altura de referência de von Karman, através da expressão:

$$z_i = 1000 z_0^{0,18} \tag{3.13}$$

Por último, para Kaimal, o espectro de resposta pode ser determinado através da expressão [12]:

$$S_L(z, n) = \frac{4 n L_{1u}(z)/v_m(z)}{(1 + 6n L_{1u}(z)/v_m(z))^{5/3}} \tag{3.14}$$

onde:

$L_{1u}(z)$ é a escala de turbulência de Kaimal, cuja expressão é:

$$L_{1u}(z) = 2,329 L_{2u}(z) \quad (3.15)$$

Para uma melhor comparação entre as hipóteses de cálculo, na Figura 3.1 estão representados os espectros de potência correspondentes aos diferentes métodos.

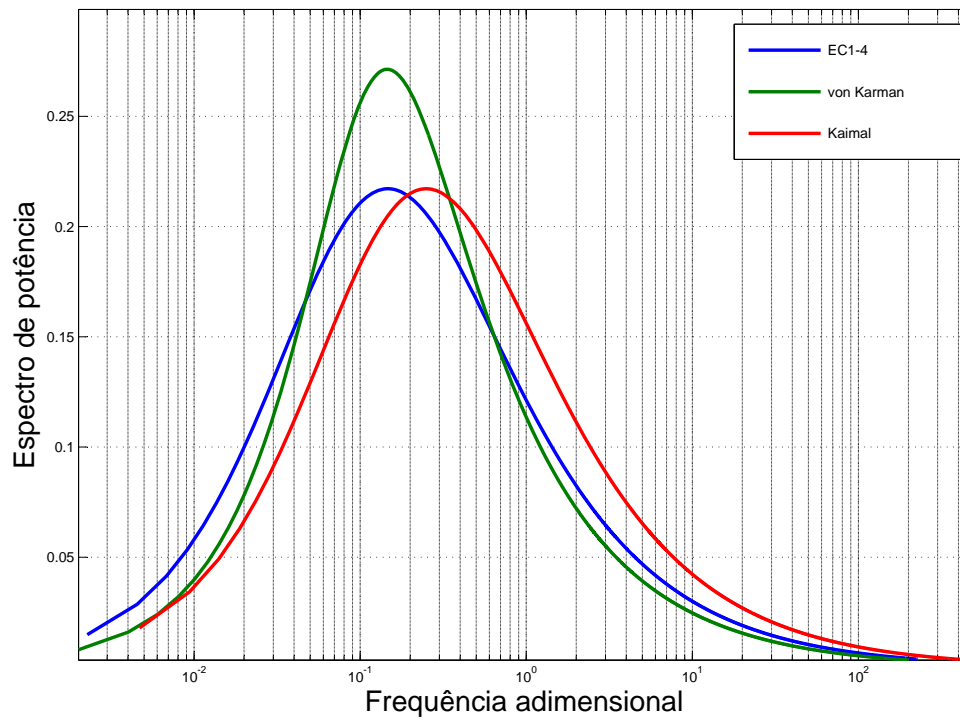


Figura 3.1: Exemplos de espectros de potência

3.3.2 Geração de perturbações

Como já referido, é habitual considerar que a turbulência pode ser representada por um processo estocástico. Perante isto, considera-se a representação deste processo a sobreposição de séries harmónicas, através da expressão:

$$\bar{v}(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.16)$$

onde:

ω_k é a frequência central da banda de largura $\Delta\omega$, calculada através da expressão:

$$\omega_k = \frac{1}{2}\Delta\omega + (k-1)\Delta\omega \quad (3.17)$$

ϕ_k é o ângulo de fase gerado aleatoriamente no intervalo $[0, 2\pi]$;

A_k é uma constante real positiva a determinar.

Sólmes demonstrou que [41]:

$$E[\bar{v}^2(t)] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N A_k^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_L(\omega) d\omega \quad (3.18)$$

Este resultado permite a representação de um processo estocástico através da sobreposição de um número elevado de séries harmónicas com amplitudes obtidas através da discretização do integral representado em (3.18). A amplitude de cada série harmónica pode ser obtida através da expressão:

$$A_k^2 = 2 S_L(\omega_k) \Delta\omega \quad (3.19)$$

Substituindo (3.19) em (3.16), obtém-se:

$$\bar{v}(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2 S_L(\omega_k) \Delta\omega} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.20)$$

Toda a geração até agora apresentada utiliza frequências angulares. A conversão de espectros de potência de frequências angulares para frequências circulares, e vice-versa, é feita através da relação:

$$A_k^2 = 2 S_L(\omega_k) \Delta\omega = 2 S_L(\omega_k) 2\pi \Delta n = 2 S'_L(n_k) \Delta n \quad (3.21)$$

ou seja,

$$S'_L(n_k) = S_L(\omega_k) 2\pi \quad (3.22)$$

A sobreposição de todas as séries harmónicas resulta na criação do sinal artificial, como demonstra a Figura 3.2.

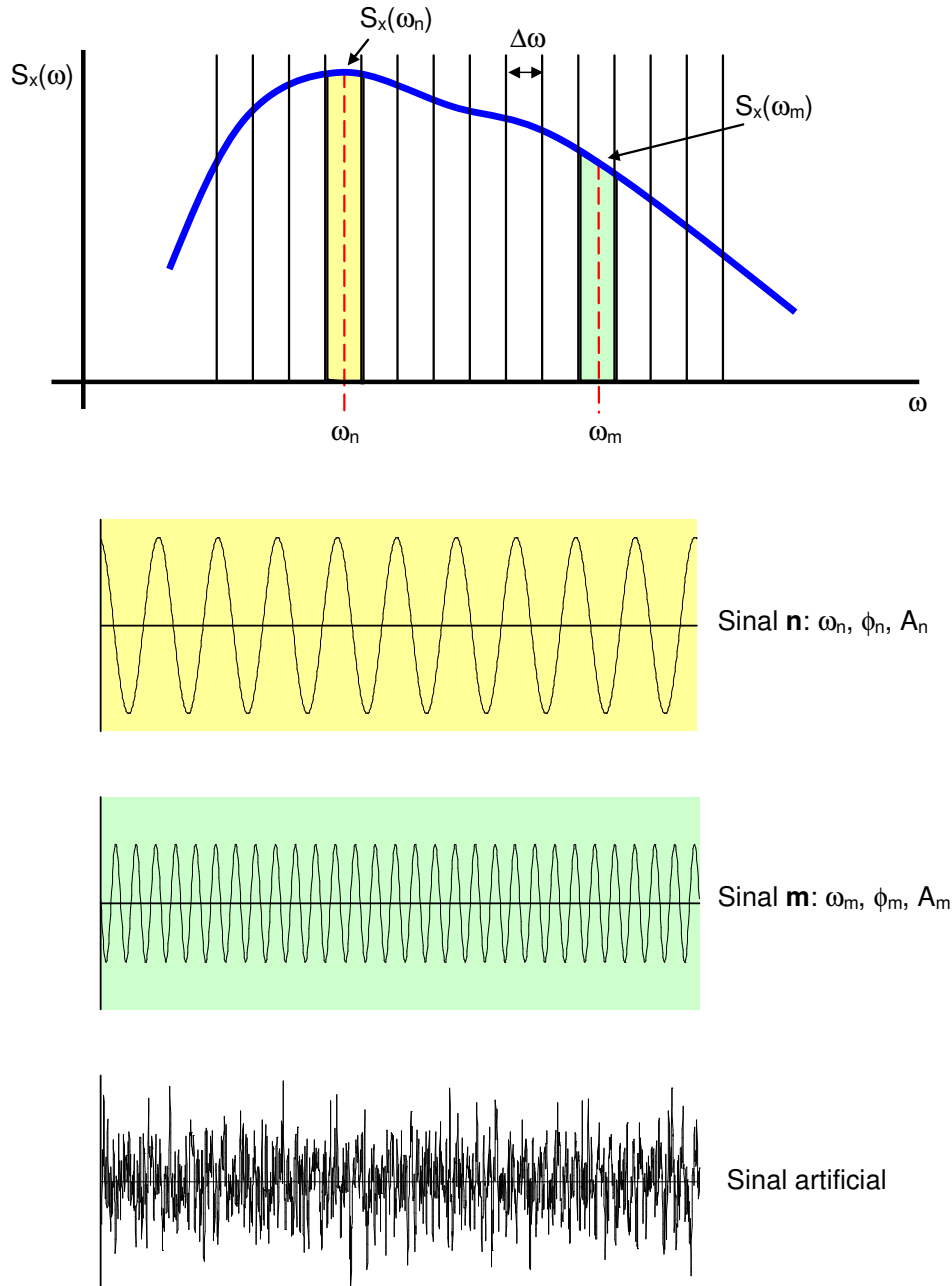


Figura 3.2: Procedimento para criação de um sinal artificial [23]

3.4 Pressão dinâmica

Determinada à altura z , a pressão dinâmica resulta da velocidade do vento, v , através da expressão:

$$q_p(z) = \frac{1}{2} \rho v^2(z) \quad (3.23)$$

onde:

ρ é a massa volúmica do ar, cujo valor recomendado é $1,25\text{kg/m}^3$.

3.5 Coeficientes de pressão

As acções do vento exercidas nas superfícies das estruturas devem ser obtidas tendo em conta as pressões exteriores e interiores devidas ao vento. Para tal, é necessário determinar os coeficientes de pressão associados às estruturas em análise.

3.5.1 Coeficientes de pressão exterior

As superfícies exteriores de uma estrutura encontram-se sujeitas a pressões exteriores, w_e , obtidas através da expressão:

$$w_e = q_p(z_{pe}) c_{pe} \quad (3.24)$$

onde:

z_{pe} é a altura de referência para a pressão exterior;

c_{pe} é o coeficiente de pressão exterior definido na Tabela 3.3 para o caso mais simples: paredes verticais de edifícios de planta rectangular.

Os coeficientes de pressão exterior aplicáveis a edifícios dependem das dimensões da superfície sujeita ao vento. Fornecidos para superfícies carregadas A de 1m^2 e de 10m^2 , são representados por $c_{pe,1}$, coeficientes locais, e por $c_{pe,10}$, coeficientes globais, respectivamente. Para a determinação do coeficiente de pressão exterior para uma superfície carregada A compreendida entre 1m^2 e 10m^2 , utiliza-se a expressão:

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A \quad (3.25)$$

A partir da Figura 3.3 pode-se efectuar uma análise para a determinação do coeficiente de pressão exterior em função da superfície carregada A .

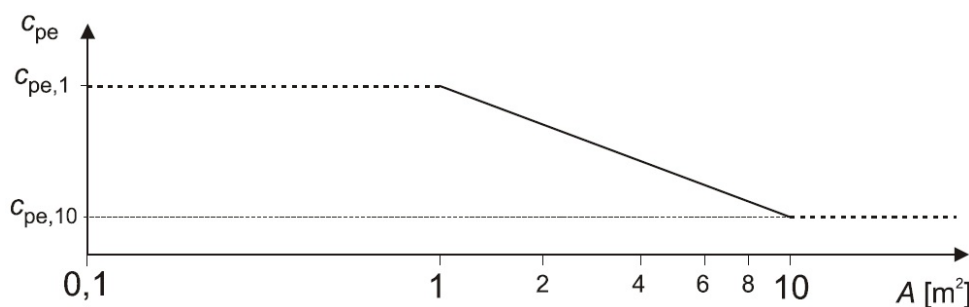


Figura 3.3: Determinação do coeficiente de pressão exterior em função da superfície carregada A [16]

A altura de referência para a pressão exterior, z_{pe} , depende da relação h/b , assim como o perfil da pressão dinâmica, como ilustrado na Figura 3.4.

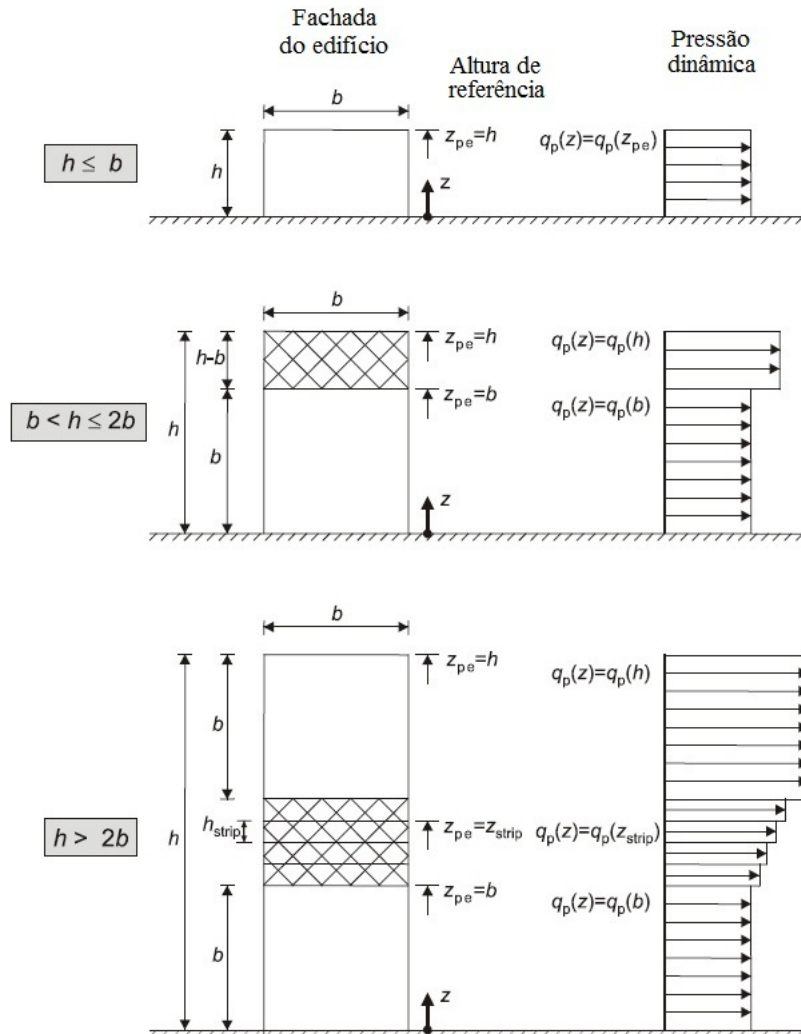


Figura 3.4: Altura de referência z_{pe} em função de h e b , e o perfil de pressão dinâmica correspondente (adaptada de [16])

Seguidamente, para obter os diferentes coeficientes de pressão, é necessário identificar as zonas afectadas em paredes verticais pela acção do vento, como sugere a Figura 3.5, onde e toma o valor de b ou $2h$, o que for menor.

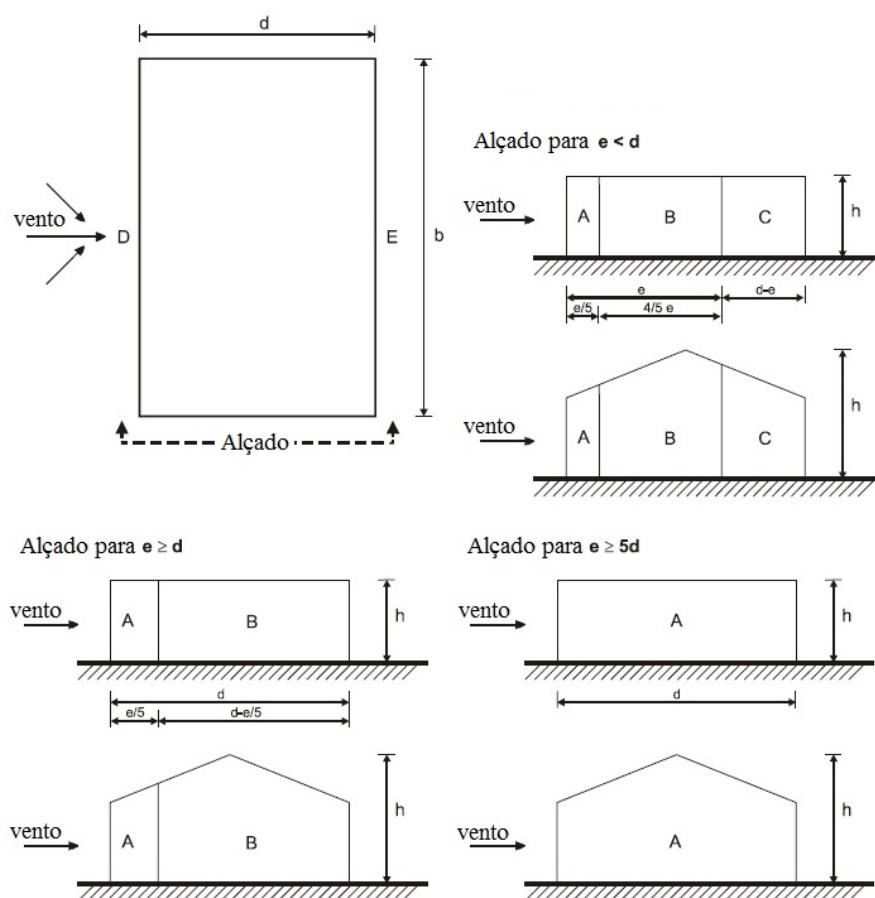


Figura 3.5: Zonas em paredes verticais (adaptada de [16])

Na Tabela 3.3 encontram-se os valores recomendados de $c_{pe,1}$ e de $c_{pe,10}$, em função da relação h/d . No caso de valores intermédios de h/d , pode-se efectuar uma interpolação linear.

Tabela 3.3: Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular [16]

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,8	+1,0	+1,0	-0,7	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,8	+1,0	+1,0	-0,5	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5	+0,7	+1,0	+1,0	-0,3	-0,3

Na cobertura, é igualmente necessário identificar as diferentes zonas afectadas, como demonstra a Figura 3.6.

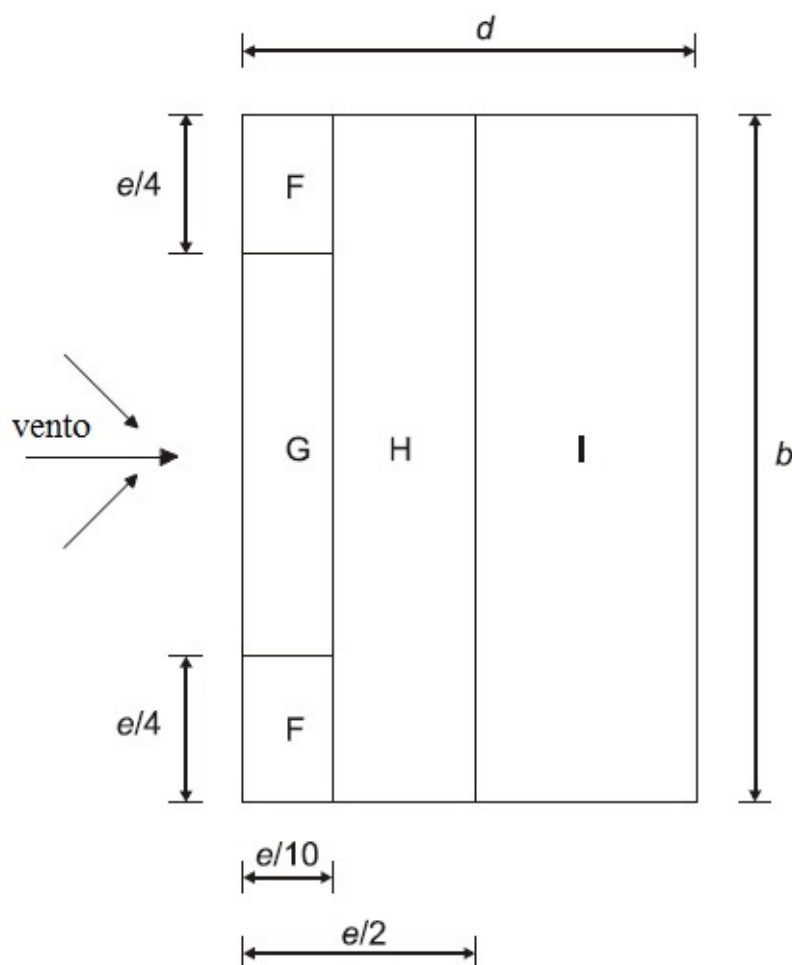


Figura 3.6: Zonas em cobertura em terraço (adaptada de [16])

Na Tabela 3.4 encontram-se os valores recomendados de $c_{pe,1}$ e de $c_{pe,10}$ para o caso em que os bordos da cobertura são em aresta viva.

Tabela 3.4: Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para coberturas com bordos em aresta viva [16]

Zona	F		G		H		I	
Tipo de cobertura	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
Bordos em aresta viva	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2

Deste modo, a pressão exterior pode ser obtida através da expressão:

$$w_e = q_p(z) c_{pe} \quad (3.26)$$

3.5.2 Coeficientes de pressão interior

O coeficiente de pressão interior, c_{pi} , depende da dimensão e da distribuição das aberturas em todo o edifício.

A existência de faces predominantes é considerada quando a área das aberturas numa face é pelo menos o dobro da área das aberturas nas restantes faces do edifício considerado.

No caso de existir uma face predominante, o coeficiente de pressão interior deve ser considerado como uma fracção do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas da face predominante.

No caso em que as aberturas na face predominante sejam o dobro da área das aberturas nas faces restantes, o coeficiente de pressão interior é dado pela expressão:

$$c_{pi} = 0,75 c_{pe} \quad (3.27)$$

No caso em que as aberturas na face predominante sejam, pelo menos, o triplo da área das aberturas nas faces restantes, o coeficiente de pressão interior é então dado pela expressão:

$$c_{pi} = 0,90 c_{pe} \quad (3.28)$$

em que c_{pe} representa o valor do coeficiente de pressão exterior ao nível das aberturas na face predominante. Se estas aberturas se localizarem em zonas com valores distintos de coeficientes de pressão exterior, utiliza-se um valor médio, ponderado em área, para c_{pe} .

Nos casos em que a área de aberturas na face predominante encontra-se entre o dobro e o triplo da área das aberturas nas faces restantes, pode-se efectuar uma interpolação linear para obter o valor de c_{pi} .

Quando não existe face predominante, o coeficiente de pressão interior deve ser determinado através da Figura 3.7, onde μ é dado pela expressão:

$$\mu = \frac{\sum \text{área das aberturas em que } c_{pe} \text{ é negativo ou } 0,0}{\sum \text{área de todas as aberturas}} \quad (3.29)$$

Para valores de h/d entre 0,25 e 1,0, pode-se efectuar uma interpolação linear.

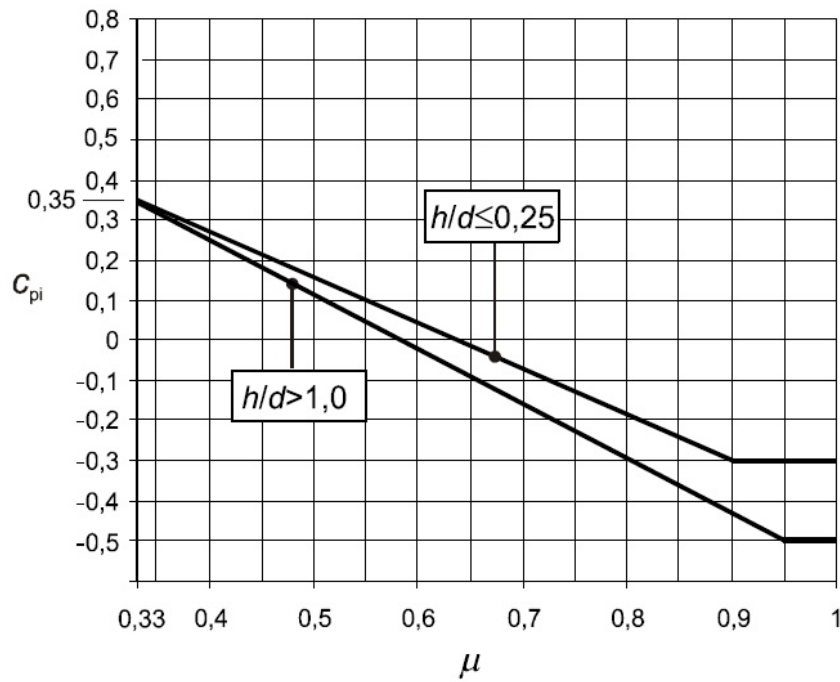


Figura 3.7: Determinação do coeficiente de pressão interior no caso de aberturas uniformemente distribuídas [16]

Desta forma, a pressão interior é dada pela expressão:

$$w_i = q_p(z) c_{pi} \quad (3.30)$$

3.5.3 Coeficientes de pressão resultante

Os coeficientes de pressão resultante são dados pela conjugação entre os coeficientes de pressão exterior e os coeficientes de pressão interior. Tal conjugação pode ser efectuada através da expressão:

$$c_{p,net} = c_{pe} + c_{pi} \quad (3.31)$$

Perante isto, a pressão total exercida pelo vento nos edifícios é dada pela expressão:

$$w = q_p(z) c_{p,net} \quad (3.32)$$

Capítulo 4

Modelação e optimização de sistemas de controlo

4.1 Introdução

No presente capítulo, são expostas as opções relativamente ao tipo de sistema de controlo utilizado, assim como, algumas das hipóteses a utilizar na acção de controlo. Os sistemas escolhidos são calibrados através de regras empíricas, para determinação dos parâmetros de configuração do controlador [24, 31, 48].

Na secção 4.2 são demonstrados os tipos de malha possíveis para o sistema de controlo e respectivas vantagens e desvantagens [31].

Na secção 4.3 são apresentadas algumas das possíveis acções de controlo a introduzir no sistema, bem como as regras empíricas de calibração utilizadas na configuração do controlador [24, 31, 48].

4.2 Tipos de malha

O tipo de malha utilizado no sistema de controlo influencia directamente a resposta do sistema. É, então, necessário identificar o sistema a controlar para optar pelo tipo de malha mais adequado para o efeito.

4.2.1 Malha aberta

Um sistema com malha aberta, MA, possui uma acção de controlo fixa, independente da resposta. Isto implica que a resposta do sistema não tem qualquer efeito na acção de controlo (*cf.* Figura 4.1). Por outras palavras, não existe comparação entre a resposta e o sinal de referência, o chamado *erro*, que iria afectar a acção de controlo [31].

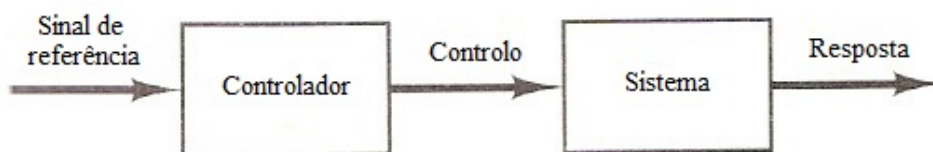


Figura 4.1: Sistema com malha aberta (adaptada de [31])

A precisão do resultado obtido depende da calibração efectuada, sendo que na presença de perturbações, o sistema de controlo não fornece a resposta pretendida. Na ausência destas e com a relação entre o sinal de referência e a resposta pretendida conhecida, este tipo de malha torna-se eficaz, uma vez que a estabilidade do sistema não é um problema.

4.2.2 Malha Fechada

Um sistema de malha fechada, MF, possui uma acção de controlo variável, dependente da comparação entre o sinal de referência e a resposta, o *erro* (cf. Figura 4.2). Sendo o principal objectivo deste tipo de malha a redução do erro do sistema, é possível conduzir a resposta do mesmo a um valor desejado.



Figura 4.2: Sistema com malha fechada (adaptada de [31])

Ao contrário dos sistemas de MA, a presença de perturbações não gera problemas nos sistemas de MF, uma vez que, ao estarem presentes, alteram a resposta do sistema. Tal alteração tem consequências directas no erro, valor que influencia a acção de controlo. Conclui-se, então, que os sistemas de MF são menos sensíveis a perturbações do que os sistemas de MA [31].

Os sistemas de MF implicam o uso de um maior número de componentes, relativamente aos sistemas de MA, o que determina o custo e o peso do sistema de controlo. É de referir, também, que o uso de sistemas de MF pode gerar problemas de instabilidade, uma vez que a excessiva correcção dos erros pode causar oscilações ou alterações de amplitude [31].

Como tal, sempre que possível, aconselha-se o uso de sistemas de MA. Uma combinação adequada dos dois tipos de malha permite uma contenção de custos e, acima de tudo, um desempenho satisfatório do sistema global [31]. Um exemplo desta combinação é o sistema de controlo híbrido HMD, onde o sistema passivo funciona em malha aberta e o sistema activo funciona em malha fechada.

4.3 Acções de controlo

Os sistemas de controlo são utilizados para introduzir uma acção de controlo na estrutura. Com um elevado número de casos, são demonstrados nesta secção os casos mais comuns.

4.3.1 Acção de controlo proporcional

Para uma acção de controlo proporcional, a relação existente entre a resposta do controlador, $u(t)$, e o erro do sistema, $e(t)$, é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.1)$$

onde K_p é denominado ganho proporcional.

Essencialmente, o controlo proporcional é um amplificador com um ganho ajustável.

4.3.2 Acção de controlo integral

Para uma acção de controlo integral, o valor da resposta do controlador, $u(t)$, é alterado com uma taxa proporcional ao erro, $e(t)$. Isto é:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (4.2)$$

ou

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (4.3)$$

onde K_i é uma constante ajustável.

É de notar que, ao contrário do que acontece na acção de controlo proporcional, o erro ser nulo num dado instante t não implica que a resposta do controlador o seja, como se pode observar nas Figuras 4.3(a) e 4.3(b), respectivamente. Isto deve-se ao facto de, na acção de controlo integral, a resposta do controlador ser dada pelo integral do erro, do instante 0 até t .

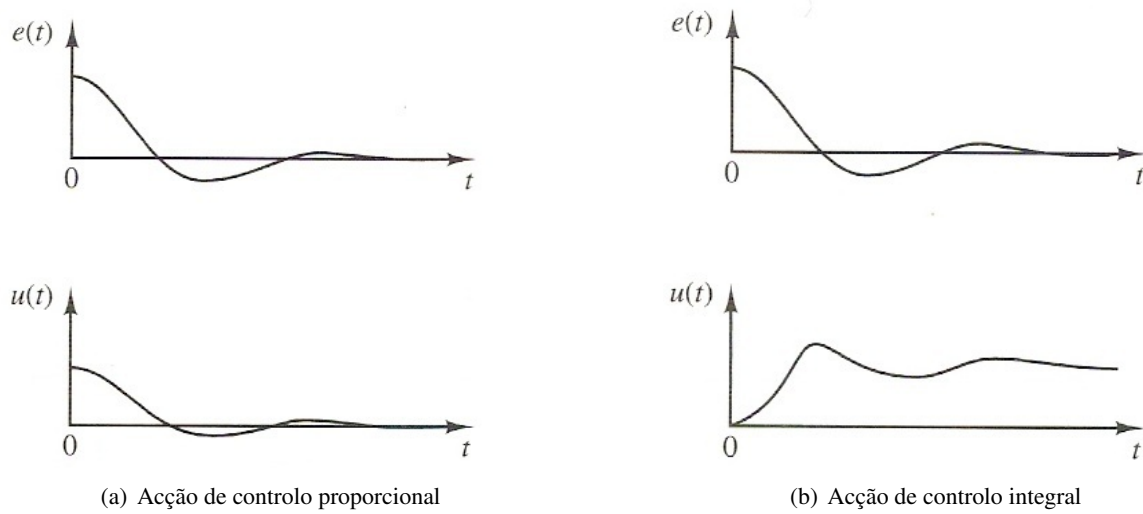


Figura 4.3: Erros e respectivas respostas do controlador nas acções de controlo proporcional e integral [31]

Por último, ao ser aplicada para remover os erros, esta acção de controlo pode provocar oscilações que podem gerar alterações de amplitude, ocorrências, essas, indesejáveis [31].

4.3.3 Acção de controlo derivativo

Para uma acção de controlo derivativo, o controlador responde à taxa de variação do erro, conseguindo, desta forma, obter uma correcção significativa antes do erro se tornar muito elevado, isto é:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.4)$$

onde K_d é uma constante ajustável.

Isto significa que o controlador antecipa o erro, e, por sua vez, aumenta a estabilidade do sistema.

Uma vez que esta acção de controlo utiliza a taxa de variação do erro no lugar do próprio erro, esta acção nunca é utilizada sozinha. É habitual realizar uma combinação com a acção de controlo proporcional, denominada acção de controlo proporcional-derivativo, PD, o que fornece um controlador de alta sensibilidade. A resposta do controlador é então dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

onde K_p e K_d são constantes ajustáveis.

A resposta pode ser dada, após substituição de K_d por $K_p T_d$, por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.6)$$

na qual K_p é o ganho proporcional e T_d o tempo derivativo, em que ambos são valores ajustáveis.

Na Figura 4.4 observam-se os efeitos da acção de controlo PD, onde se pode verificar a referida antecipação do erro com um tempo T_d .

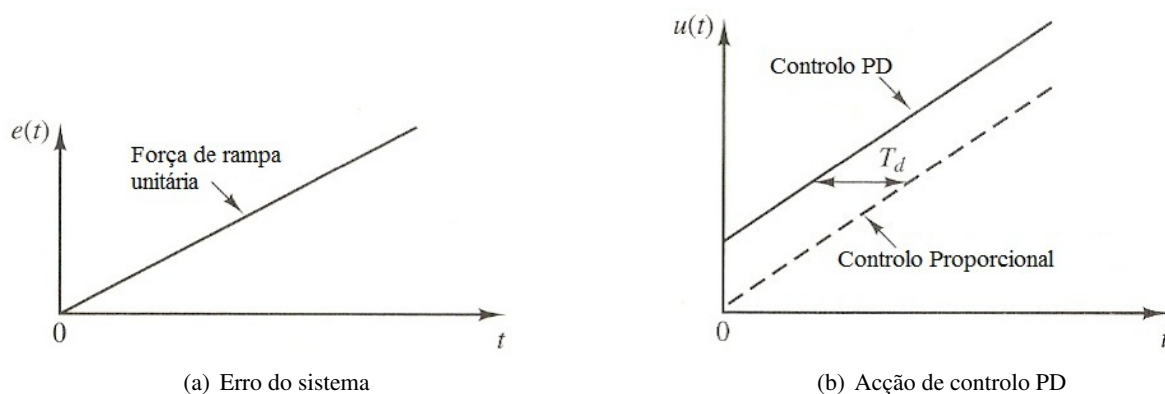


Figura 4.4: Erro e resposta do controlador com acção de controlo PD (adaptada de [31])

Uma acção de controlo somente eficaz em períodos transitórios, não afecta directamente o erro do estado estacionário, mas introduz amortecimento no sistema, o que permite o uso de valores de K_p mais elevados, fornecendo um aumento da precisão do estado estacionário [31].

4.3.4 Acção de controlo proporcional-integral-derivativo

Para a acção de controlo proporcional-integral-derivativo, PID, são combinadas as três acções de controlo básicas existentes, onde se juntam as vantagens de cada uma delas. A resposta do controlador para este tipo de acção é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.7)$$

A resposta do controlador, após substituição de K_i por $\frac{K_p}{T_i}$ e K_d por $K_p T_d$, pode ser dada pela seguinte expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.8)$$

onde K_p é o ganho proporcional, T_d o tempo derivativo e T_i é o tempo integral, cujos valores são ajustáveis. A Figura 4.5 apresenta os benefícios da utilização da acção de controlo PID, onde, para além da antecipação do erro com um tempo T_d , verifica-se um aumento da velocidade da acção de controlo devido à introdução da acção de controlo integral.

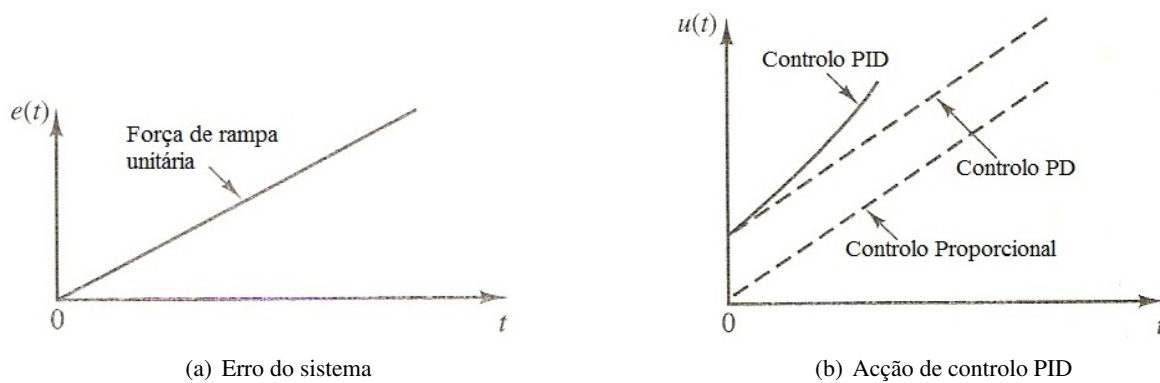


Figura 4.5: Erro e resposta do controlador com acção de controlo PID (adaptada de [31])

4.4 Sintonização de controladores

O processo de selecção das constantes do controlador, para obter o desempenho desejado, é conhecido por sintonização de controladores. Na maior parte dos sistemas dinâmicos, a obtenção do modelo matemático que rege o comportamento do sistema é muito complicado, pelo que obter o valor das constantes analiticamente não é possível.

Ziegler e Nichols (Z&N) sugeriram então dois métodos de sintonização dos controladores (ou seja, definir valores para K_p , T_i e T_d) baseados em respostas experimentais. Em ambos, tem-se como limite uma resposta máxima do sistema, $c(t)$, 25% superior à resposta em estado estacionário, como demonstra a Figura 4.6.

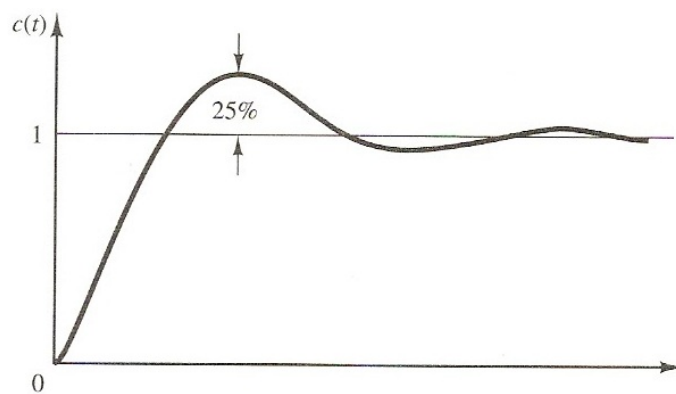


Figura 4.6: Resposta do sistema à acção de controlo [31]

4.4.1 Primeiro método de Ziegler-Nichols

Neste primeiro método, o sistema é sujeito a uma força unitária, onde a resposta esperada tem de ter uma forma em “S” (cf. Figura 4.7). Caso isso não se verifique, este método não pode ser utilizado.

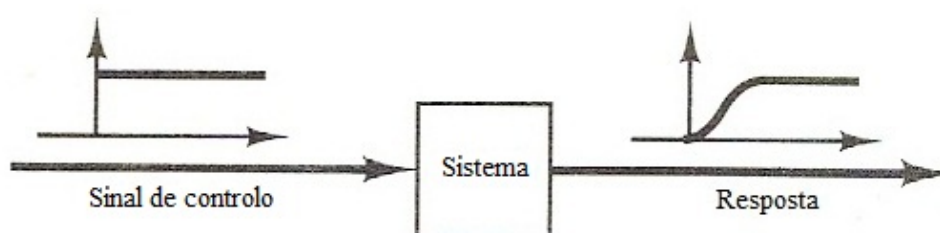


Figura 4.7: Resposta do sistema à acção de controlo através do primeiro método de Z&N (adaptada de [31])

A curva em forma de “S” pode ser caracterizada por duas constantes: tempo de atraso, L , e constante temporal T . Estas constantes são obtidas através de uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva, ao determinar as intersecções da linha tangente com o eixo da variável tempo e a recta que determina a resposta do sistema em estado estacionário, como demonstra a Figura 4.8.

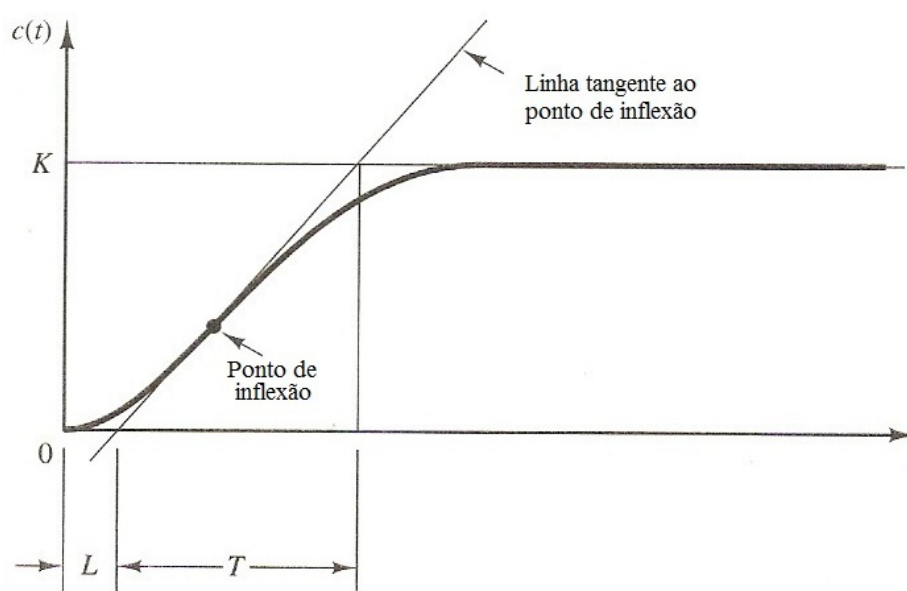


Figura 4.8: Determinação das constantes L e T do primeiro método de Z&N (adaptada de [31])

Z&N sugeriram que os valores de K_p , T_i e T_d fossem determinados, em função de L e T , através da Tabela 4.1 [48]:

Tabela 4.1: Valores de K_p , T_i e T_d (Primeiro método de Z&N) [31]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

4.4.2 Segundo método de Ziegler-Nichols

Por sua vez, tem-se o método de Ziegler-Nichols que não apresenta as limitações do anterior, uma vez que não necessita que a resposta do sistema seja em forma de “S” para poder ser aplicado [31].

Neste segundo método, é considerada inicialmente uma acção de controlo apenas proporcional, onde os parâmetros T_i e T_d tomam os valores ∞ e 0, respectivamente. Com um contínuo incremento de K_p de 0 até um valor crítico, K_{cr} , o sistema exibe então oscilações harmónicas sustentadas, situação essa de instabilidade eminente, com um período crítico, P_{cr} , correspondente (cf. Figura 4.9).

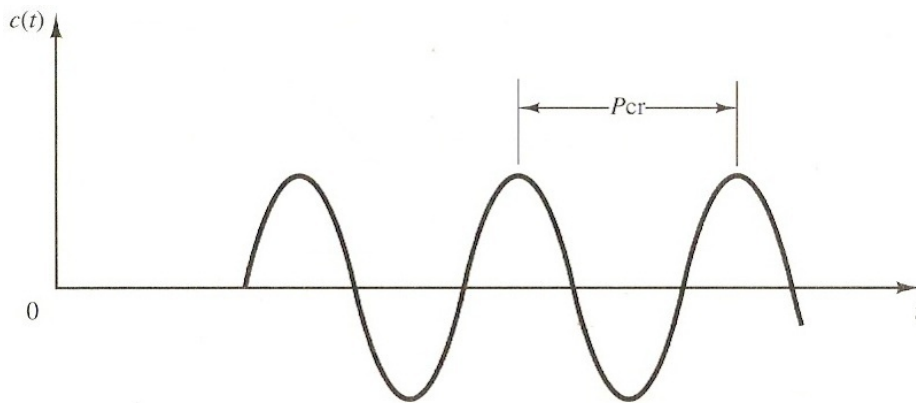


Figura 4.9: Oscilações harmónicas sustentadas e respectivo período crítico, P_{cr} , correspondente ao segundo método de Z&N [31]

Obtidos os valores de K_{cr} e P_{cr} , Z&N sugeriram que os parâmetros K_p , T_i e T_d fossem determinados através da Tabela 4.2 [48].

Tabela 4.2: Valores de K_p , T_i e T_d (Segundo método de Z&N) [31]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1.2}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Este método tem somente um inconveniente: a necessidade de existir um K_p que torne o sistema instável. Se tal não acontecer, o método não poderá ser utilizado.

Para contornar esta situação, o controlador pode ser sintonizado através do *The Good Gain Method*, TGGM, exposto na secção seguinte.

4.4.3 The Good Gain Method

Este método, como referido, não necessita que o sistema se torne instável para ser aplicado. O processo para a determinação dos parâmetros inicia-se da mesma forma que o segundo método de Ziegler-Nichols, ao considerar a acção de controlo somente proporcional [24].

Com K_p inicialmente com o valor 0, incrementa-se o mesmo até se verificar uma estabilidade satisfatória na resposta da estrutura. Ao observar, em relação à resposta em estado estacionário, alguma resposta superior e uma escassa resposta inferior, assume-se que o sistema tem uma boa estabilidade. Assim, o valor obtido de K_p é denominado K_{PGG} [24].

O valor de T_i é dado pela expressão:

$$T_i = 1.5 T_{ou} \quad (4.9)$$

onde:

T_{ou} é o tempo entre a resposta superior e inferior com a acção de controlo proporcional, como evidencia a Figura 4.10.

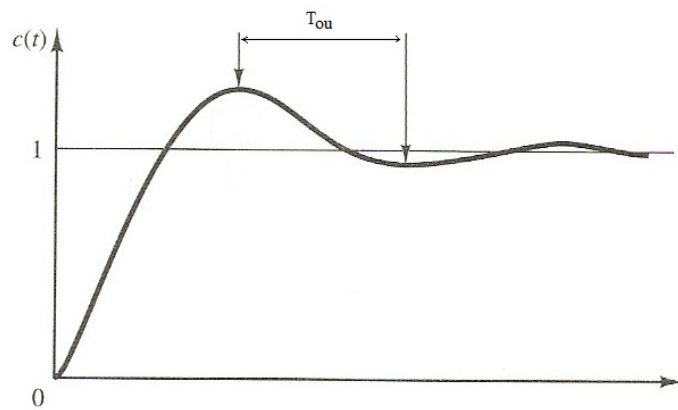


Figura 4.10: Determinação do tempo entre a resposta superior e inferior (adaptada de [31])

Com a introdução da acção de controlo integral, a estabilidade do sistema é reduzida [24]. Para compensar esta situação, o valor de K_p é reduzido para 80% do valor inicial, ou seja:

$$K_p = 0.80 K_{PGG} \quad (4.10)$$

Para a introdução da acção de controlo derivativo, T_d toma o seguinte valor:

$$T_d = \frac{T_i}{4} \quad (4.11)$$

Esta relação é idêntica à utilizada nos métodos de Ziegler-Nichols. Os valores sugeridos para os parâmetros nas diferentes situações de controlo encontram-se resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de K_p , T_i e T_d (TGGM) [24]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$K_{p_{GG}}$	∞	0
PI	$0.8K_{p_{GG}}$	$1.5T_{ou}$	0
PID	$0.8K_{p_{GG}}$	$1.5T_{ou}$	$0.375T_{ou}$

Capítulo 5

Exemplo de estudo

5.1 Introdução

Neste capítulo é estudada a resposta estrutural de uma fachada de vidro num edifício, situado no campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, sito no Monte da Caparica, sujeita à acção dinâmica do vento.

Procede-se a uma análise modal da estrutura portante da fachada, através do programa de cálculo automático, *SAP2000*, para uma caracterização do seu comportamento dinâmico.

A acção dinâmica do vento é determinada segundo o EC1-4, com recurso a um espectro de potência para o cálculo das perturbações da mesma [16].

As deformações na estrutura são obtidas com recurso a um método de integração numérica, sendo posteriormente feita a verificação da segurança relativamente aos estados limites últimos (ELU's).

5.2 Estrutura em estudo

O edifício em estudo tem as dimensões $20\text{m} \times 20\text{m} \times 8\text{m}$ (largura \times comprimento \times altura) com uma das fachadas em vidro, composta por painéis de vidro de dimensões $2\text{m} \times 2\text{m}$ (largura \times altura), ilustrada de forma representativa na Figura 5.1.

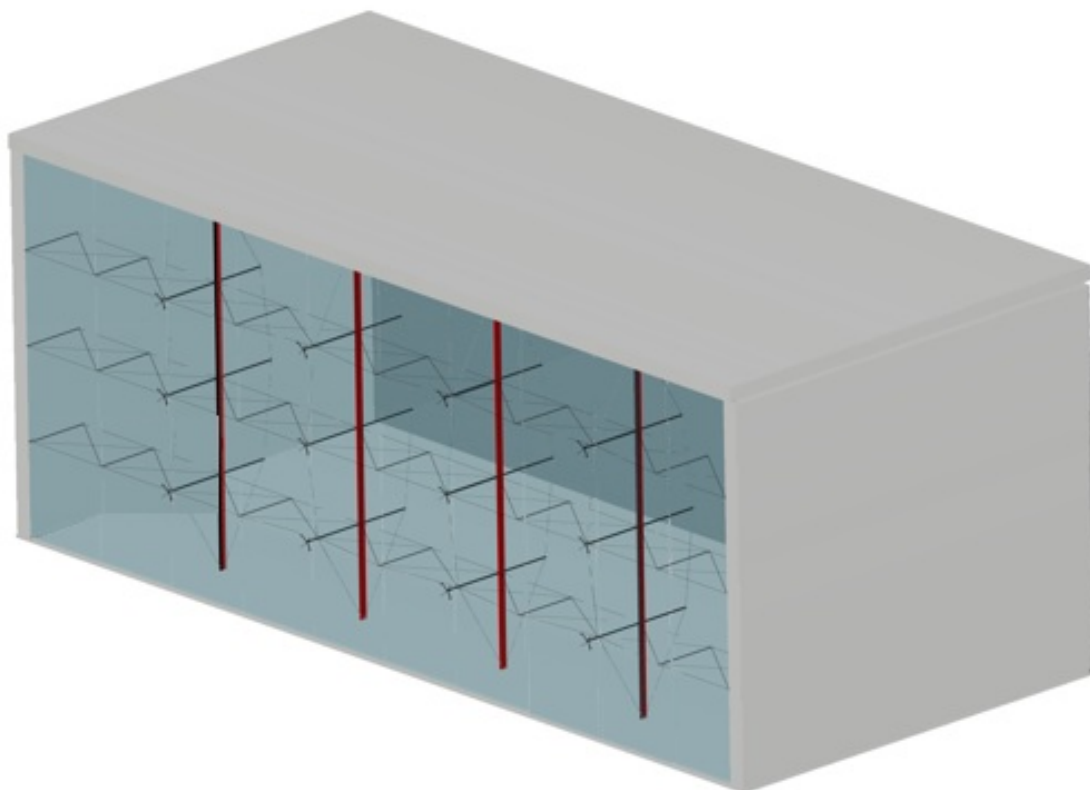


Figura 5.1: Edifício em estudo

A estrutura portante, composta por perfis IPE 140, perfis tubulares Celsius 355 com dimensões 21,3mm \times 2,6mm (diâmetro \times espessura) e por cabos de pré-esforço em aço inoxidável Bridon, do tipo Dyform, com 10mm de diâmetro, suporta os painéis de vidro temperado SGG com 8mm de espessura através de sistemas de fixação FITECHNIC em aço inox AISI 360. As características referentes a estes materiais encontram-se nos anexos B, C, D, E e F, respectivamente.

Para contraventamento, foram utilizados três alinhamentos de cabos de pré-esforço idênticos aos existentes na estrutura portante, às alturas de dois, quatro e seis metros, com duas configurações distintas, apresentadas nas Figuras 5.2(a) e 5.2(b).



(a) altura de dois e seis metros



(b) altura de quatro metros

Figura 5.2: Configuração dos cabos horizontais

A diferença na configuração dos cabos deve-se à geometria da estrutura portante. Para uma melhor interpretação, apresenta-se um corte da mesma na Figura 5.3.

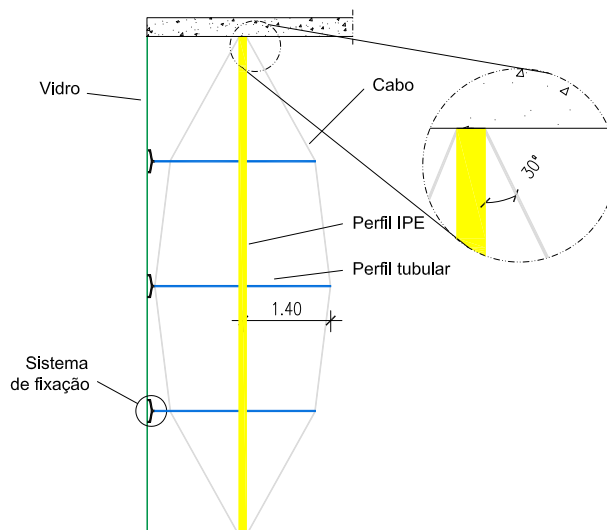


Figura 5.3: Corte estrutural

5.3 Análise modal

Para a definição das características dinâmicas da estrutura é necessário definir o modelo que represente a estrutura durante a sua análise.

Deste modo, admitem-se as seguintes considerações:

- Todos os elementos são considerados bi-rotulados, de modo a diminuir a contribuição do esforço transversal;
- Considera-se que a estrutura é rotulada nas extremidades;
- O amortecimento na estrutura é considerado nulo;
- Os painéis de vidro são modelados como elementos finitos do tipo *shell*;
- Os cabos, os espaçadores, os perfis IPE e as aranhas são modelados como elementos finitos do tipo *frame*;
- As aranhas são rotuladas na extremidade em contacto com os painéis de vidro, para evitar a transferência de esforços de flexão.

Na Figura 5.4 pode-se observar o modelo utilizado para a análise da estrutura.

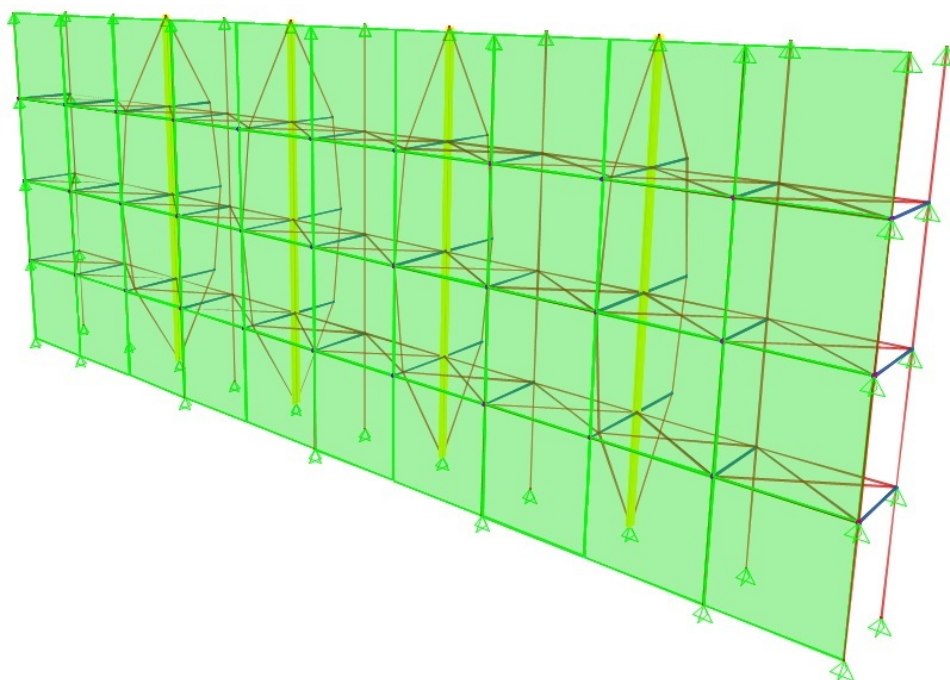


Figura 5.4: Modelo da estrutura em SAP2000

Relativamente aos elementos utilizados, as características necessárias para a correcta análise da estrutura estão descritas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Características dos elementos estruturais

Elemento	E [GPa]	A [cm ²]	I [cm ⁴]
Perfil IPE 140	200	16,43	541,2
Perfil tubular	200	1,53	0,681
Cabo Bridon	147	0,71	-

Tabela 5.2: Características do vidro

Tipo de vidro	t [mm]	ρ [kg/m ³]
Vidro temperado	8	2500

Através da análise modal efectuada pelo programa de cálculo automático SAP2000 é possível obter as frequências e modos de vibração do modelo estrutural considerado. São desprezados alguns modos de vibração locais e modos de vibração simétricos relativamente aos modos de vibração fundamentais, sendo utilizados para análise os modos de vibração ilustrados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7. Na Tabela 5.3 são apresentadas as frequências de vibração da estrutura relativas aos modos de vibração considerados.

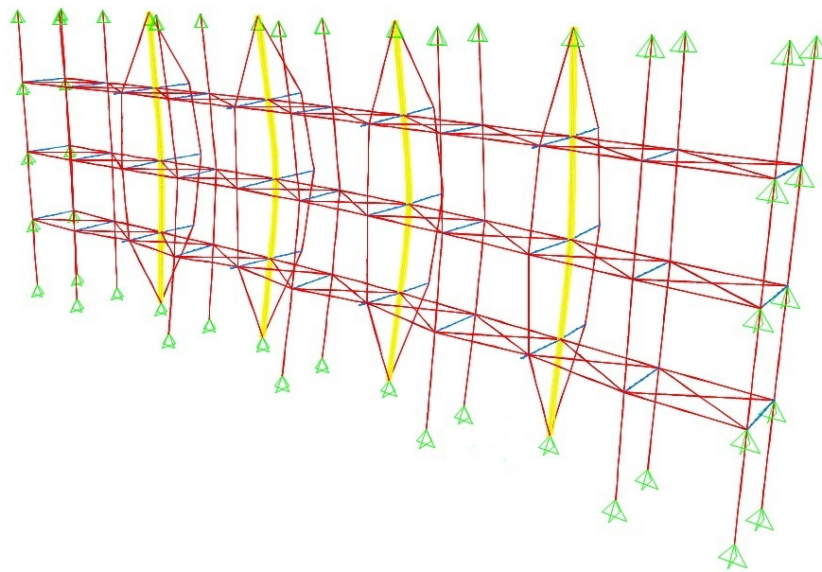


Figura 5.5: Primeiro modo de vibração fundamental

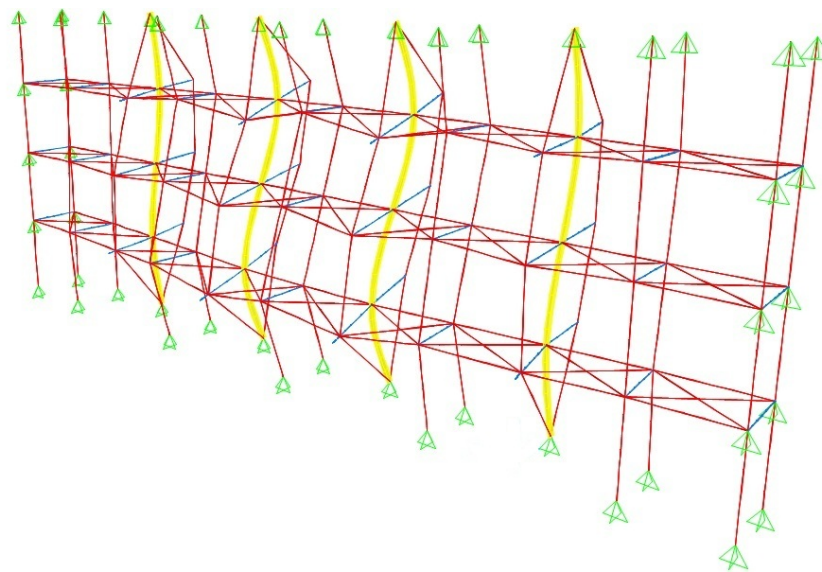


Figura 5.6: Segundo modo de vibração fundamental

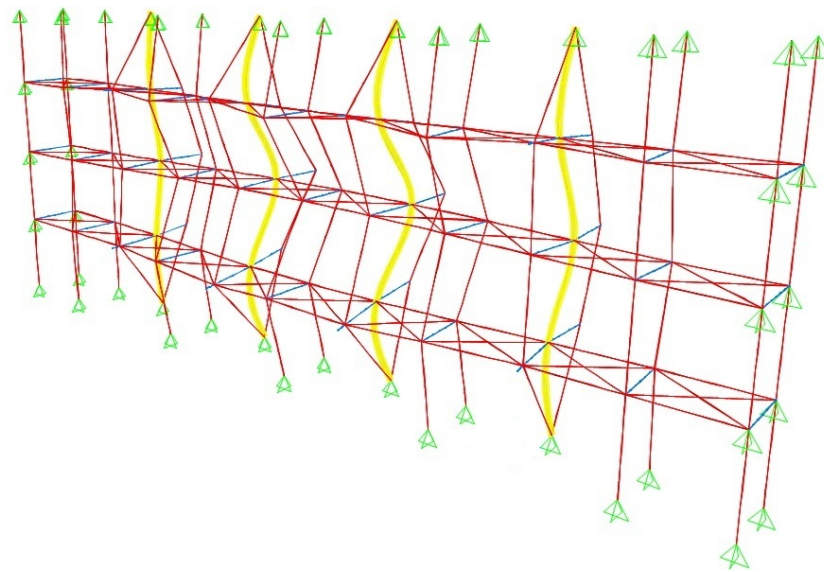


Figura 5.7: Terceiro modo de vibração fundamental

Tabela 5.3: Frequências próprias de vibração

Modo de vibração fundamental	ω [rad/s]	f [Hz]
Primeiro modo	69,43	11,05
Segundo modo	70,62	11,24
Terceiro modo	145,27	23,12

O comportamento da estrutura será estudado através de uma análise bidimensional. Para tal, admitem-se algumas considerações:

- As massas associadas aos painéis de vidro são consideradas como massas concentradas ao nível dos graus de liberdade de translacção;
- Tomam-se seis graus de liberdade: três de translacção e três de rotação;
- A estrutura de suporte é considerada de forma isolada relativamente aos painéis de vidro.

Na Figura 5.8 podem ser observadas as considerações no modelo utilizado para a análise da estrutura.

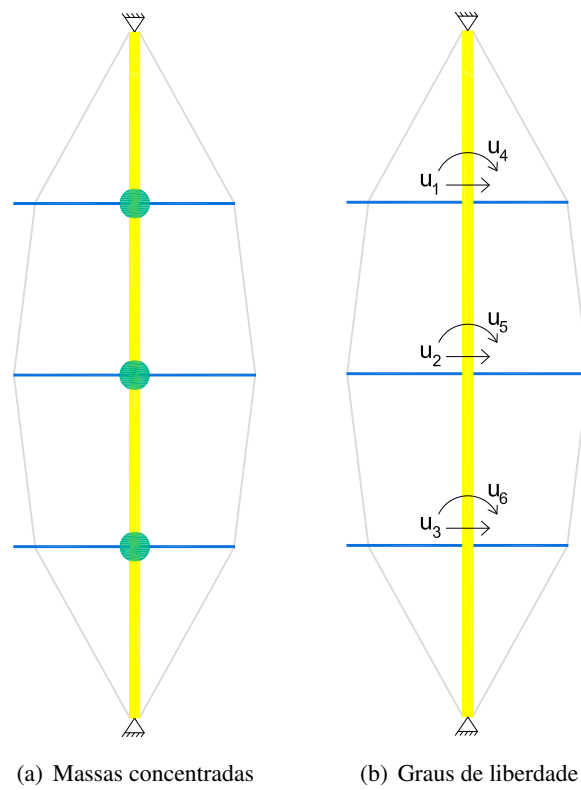


Figura 5.8: Hipóteses consideradas no modelo bidimensional

O valor das massas concentradas é obtido, após definição de áreas de influência, com um valor de 8m^2 (cf. Figura 5.9), através da equação (5.1).

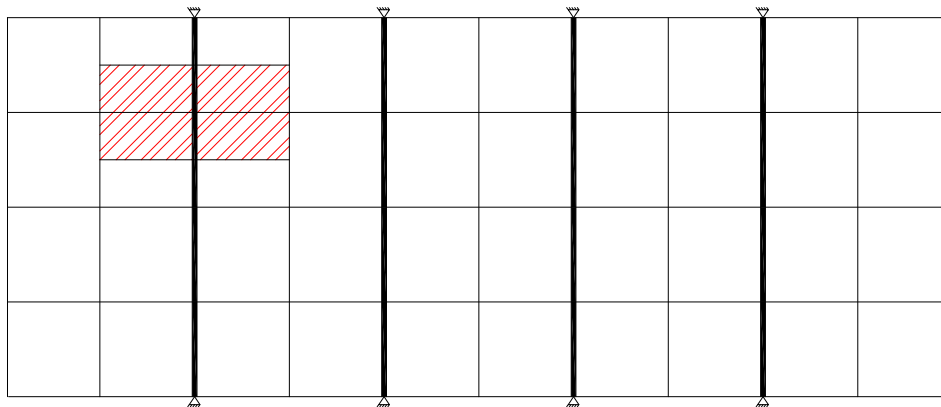


Figura 5.9: Área de influência para massas concentradas

$$m = \rho \times A \times t \quad (5.1)$$

onde:

ρ é a massa volúmica do vidro;

A é a área de influência do nó;

t é a espessura dos painéis de vidro.

Como já referido, através do programa de cálculo automático SAP2000, é possível obter as frequências e modos de vibração do modelo estrutural considerado. Para que a simplificação da análise da estrutura global através de um modelo bidimensional seja validada, as frequências obtidas têm que ser semelhantes entre o modelo global e o modelo bidimensional. Nas Figuras 5.10(a), 5.10(b) e 5.10(c) encontram-se ilustrados os modos de vibração fundamentais do modelo bidimensional. Na Tabela 5.4 são apresentadas as frequências de vibração das estruturas relativas aos modos de vibração considerados para análise.

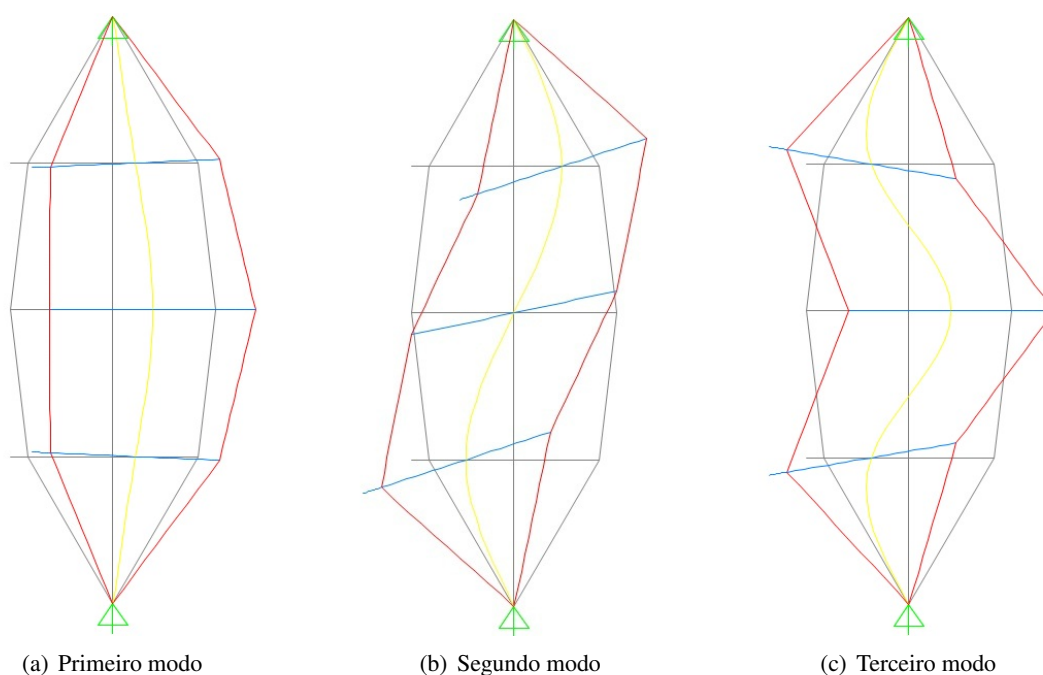


Figura 5.10: Modos de vibração no modelo bidimensional

Tabela 5.4: Frequências próprias de vibração dos modelos considerados

Modo de vibração fundamental	ω [rad/s]		f [Hz]	
	Global	Bidimensional	Global	Bidimensional
Primeiro modo	69,43	65,74	11,05	10,46
Segundo modo	70,62	67,20	11,24	10,69
Terceiro modo	145,27	144,59	23,12	23,01

Através da Tabela 5.4, chega-se à conclusão que a simplificação do modelo global para um modelo bidimensional é válida, uma vez que as frequências obtidas nos dois modelos são próximas. As frequências no modelo global são mais elevadas como consequência da estrutura global se encontrar

fixa nas extremidades laterais, o que lhe confere uma maior rigidez. Este facto poderia ser atenuado se a estrutura tivesse um maior comprimento, diminuindo a contribuição da fixação nas extremidades.

Ainda através do programa de cálculo automático SAP2000, são obtidas as matrizes de rigidez e de massa, necessárias para a continuação do estudo, apresentadas em seguida.

$$K = \begin{bmatrix} 2437,49 & -1384,04 & 415,47 & -769,52 & -1602,56 & 5,88 \\ -1384,04 & 3337,95 & -1384,04 & 1614,64 & 0 & -1614,64 \\ 415,47 & -1384,04 & 2437,49 & -5,88 & 1602,56 & 769,52 \\ -769,52 & 1614,64 & -5,88 & 3857,79 & 1034,38 & -9,19 \\ -1602,56 & 0 & 1602,56 & 1034,38 & 4341,49 & 1034,38 \\ 5,88 & -1614,64 & 769,52 & -9,19 & 1034,38 & 3857,79 \end{bmatrix} [kN/m]$$

$$M = \begin{bmatrix} 0,1858 & & & & & \\ & 0,1858 & & & & \\ & & 0,1858 & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix} [ton]$$

Na existência de graus de liberdade cuja massa associada é nula, a criação de matrizes condensadas permite que a análise dinâmica seja efectuada somente nos graus de liberdade com massas associadas. Deste modo, através da expressão (5.2), é efectuada uma condensação da matriz de rigidez para os graus de liberdade u_1 , u_2 e u_3 :

$$\hat{k}_{tt} = k_{tt} - k_{0t}^T k_{00}^{-1} k_{0t} \quad (5.2)$$

onde \hat{k}_{tt} é a matriz de rigidez condensada e as restantes matrizes são obtidas através da seguinte divisão da matriz de rigidez inicial:

$$\left[\begin{array}{c|c} k_{tt} & k_{t0} \\ \hline k_{0t} & k_{00} \end{array} \right]$$

Tal divisão deve também ser efectuada na matriz de massa, de forma análoga, como demonstrado na seguinte expressão:

$$\left[\begin{array}{c|c} m_{tt} & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} \right]$$

Depois de efectuada a divisão na matriz em estudo e realizados os cálculos, obtém-se a seguinte matriz de rigidez condensada:

$$\hat{k}_{tt} = \begin{bmatrix} 1768,20 & -1060,28 & 929,28 \\ -1060,28 & 1989,58 & -1060,28 \\ 929,28 & -1060,28 & 1768,20 \end{bmatrix} [kN/m]$$

Por sua vez, a matriz de massa condensada é:

$$m_{tt} = \begin{bmatrix} 0,1858 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1858 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1858 \end{bmatrix} [ton]$$

Por último, e ainda com recurso ao programa de cálculo automático SAP2000, são obtidos os modos de vibração da estrutura correspondentes às suas frequências naturais.

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0,439 & 0,707 & 0,554 \\ 0,784 & 0 & -0,621 \\ 0,439 & -0,707 & 0,554 \end{bmatrix}$$

5.4 Acção dinâmica do vento

A acção dinâmica do vento, a que a fachada se encontra sujeita, é determinada segundo o EC1-4 [16]. Como referido no Capítulo 3, a acção do vento é definida através da sua velocidade pela expressão (3.1). Através do procedimento de cálculo, referido no mesmo capítulo, é possível obter os valores necessários para a definição do valor médio da velocidade, v_m .

Uma estrutura com 8 m de altura total, z , situada numa faixa costeira com 5 km de largura, corresponde uma categoria de terreno I, em que z_0 e z_{min} tomam os valores de 0,005 m e 1 m, respectivamente. Na Tabela 5.5 estão definidos os parâmetros necessários para a determinação de $v_m(z)$.

Tabela 5.5: Parâmetros para o cálculo de $v_m(z)$

Parâmetro	Valor
$v_{b,0}$ [m/s]	30
c_{dir} [-]	1,0
c_{season} [-]	1,0
v_b [m/s]	30
$c_o(z)$ [-]	1,0
k_r [-]	0,16
$c_r(z)$ [-]	1,19

Assim, com recurso à expressão (3.3), obtém-se o valor v_m de 35,79 m/s.

Para a determinação da turbulência, é necessário definir um espectro de potência para a geração das perturbações. No Capítulo 3 foram exemplificados três tipos de espectros de potência: EC1-4, von Karman e Kaimal [16, 31]. No caso em estudo, é utilizado o espectro de potência segundo o EC1-4 por se tratar de uma zona com turbulência atmosférica.

A Tabela 5.6 apresenta os parâmetros necessários para a correcta definição do espectro de potência, calculados de acordo com o descrito no Capítulo 3.

Tabela 5.6: Parâmetros para o cálculo do espectro de potência

Parâmetro	Valor
α	0,4051
$L(z)$	81,44

Desta forma, ao utilizar as expressões (3.8) e (3.7) obtém-se o espectro de potência ilustrado na Figura 5.11.

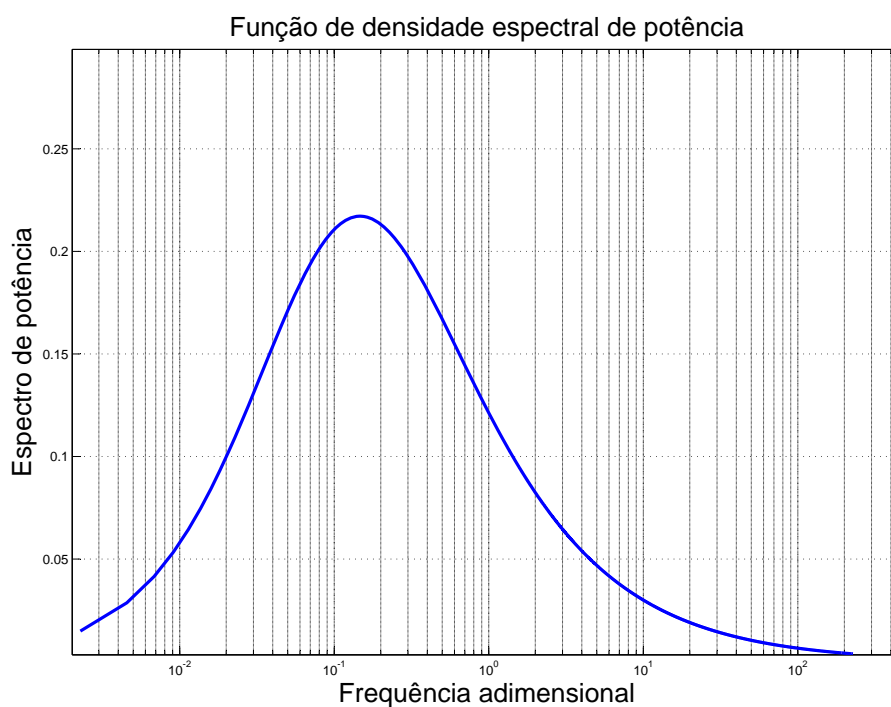


Figura 5.11: Espectro de potência

Através deste espectro de potência é possível gerar séries harmónicas que, ao serem sobrepostas, representam a turbulência como um processo estocástico. Assim, com a utilização da expressão (3.20), é necessário definir algumas considerações para a determinação das séries harmónicas:

- A largura de banda definida, $\Delta\omega$ ou Δn , toma o valor de 0,05;

- São geradas duas mil séries harmônicas para a composição da turbulência;
- A turbulência é gerada para um período de dez segundos com valores determinados em cada centésimo de segundo.

Após a geração das séries harmônicas, é efectuada a sua sobreposição, obtendo-se os valores da turbulência. Como se tratam de valores gerados aleatoriamente, são criadas dez séries de turbulência que, em conjunto com a velocidade média do vento, são analisadas e determinado o valor médio correspondente dos resultados, valor utilizado para realizar as verificações necessárias. Na Figura 5.12 apresenta-se a turbulência gerada para um dos casos e na Figura 5.13 é possível visualizar a distribuição da velocidade do vento ao longo de um período de dez segundos para esse mesmo caso.

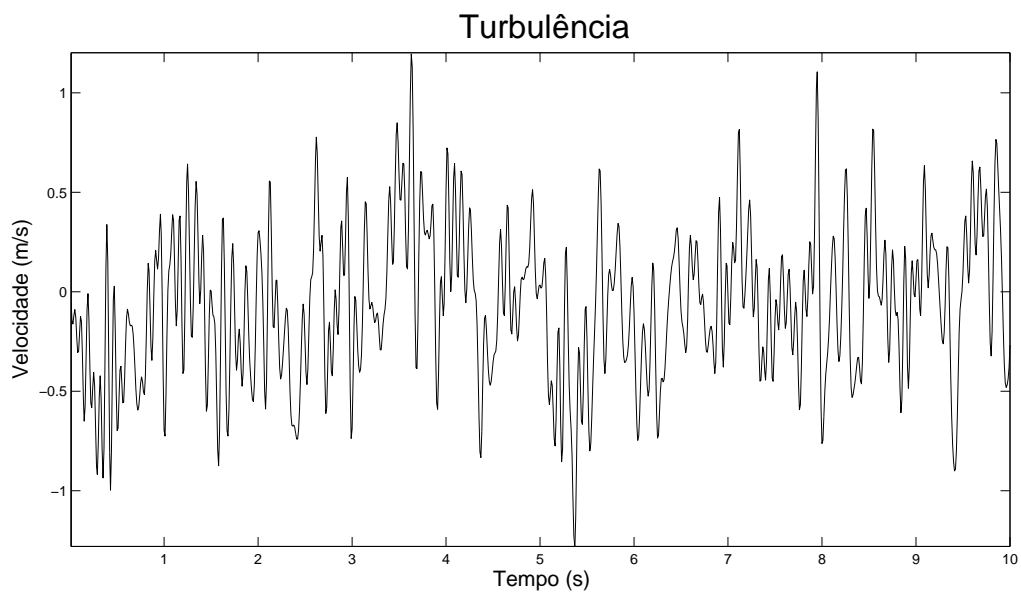


Figura 5.12: Geração da turbulência para um período de dez segundos

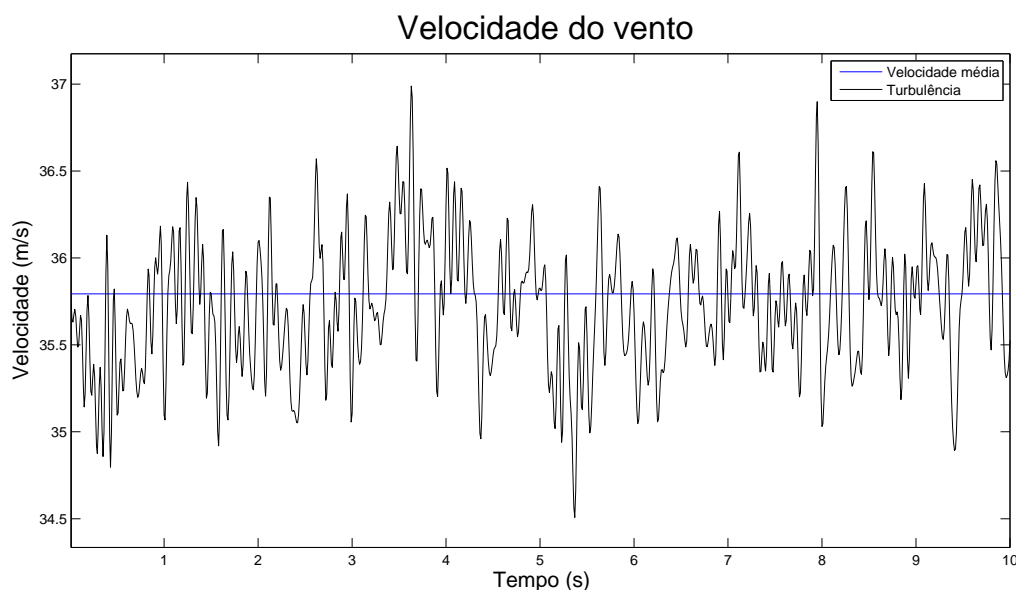


Figura 5.13: Velocidade do vento para um período de dez segundos

Obtida a velocidade do vento, segue-se o cálculo da pressão dinâmica do vento, para cada instante, através da expressão (3.23). Com os coeficientes de pressão é possível quantificar a intensidade que a pressão do vento exerce nas faces da estrutura. No caso em estudo, a única face relevante para a análise é a fachada de vidro. Através do procedimento descrito no Capítulo 3, são determinados os coeficientes de pressão exterior, interior e resultante. Estes valores são apresentados nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9. O coeficiente de pressão exterior utilizado é o $c_{pe,10}$, uma vez que a fachada tem uma área de 160m^2 .

Tabela 5.7: Coeficientes de pressão exterior

Zona	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
$c_{pe,10}$	-1,2	-0,8	-0,5	0,72	-0,34	-1,8	-1,2	-0,7	-0,2	0,2

Tabela 5.8: Coeficientes de pressão interior

Caso	I_{negativo}	I_{positivo}
μ	0,846	0,615
c_{pi}	-0,26	0,01

Tabela 5.9: Coeficientes de pressão resultante

Zona	A	B	C	D	E	F	G	H	I
$c_{p,net}$ (I_{negativo})	-0,94	-0,54	-0,24	0,98	-0,08	-1,54	-0,94	-0,44	0,06
$c_{p,net}$ (I_{positivo})	-1,21	-0,81	-0,51	0,71	-0,35	-1,81	-1,21	-0,71	0,19

Para efeitos de cálculo, considera-se que a pressão total do vento está concentrada nos nós correspondentes à estrutura portante através da expressão:

$$W = w \times A_{nó} \quad (5.3)$$

5.5 Resposta da estrutura

Quando a acção que incide na estrutura se encontra definida de forma discreta (por instantes de tempo) e não de forma contínua (através de uma função), o cálculo da resposta da estrutura pode ser efectuado numericamente.

O método utilizado para estas situações baseia-se na interpolação da acção que incide na estrutura em cada intervalo de tempo [18]. Este método tem-se mostrado bastante eficaz quando o espaço de tempo é reduzido, sendo principalmente utilizado para sistemas com um grau de liberdade. No entanto, a sua utilização em sistemas com vários graus de liberdade pode ser efectuada se a resposta da estrutura for obtida através de sobreposição modal, como é o caso em estudo.

Assim, a acção é definida, num dado intervalo de tempo, através da expressão:

$$p(\tau) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (5.4)$$

onde:

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_i.$$

Para o caso geral de um sistema com amortecimento, a equação de movimento é dada pela expressão:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + k u = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (5.5)$$

A resposta da estrutura ao longo do tempo é, então, dada pela seguinte expressão [18]:

$$\begin{aligned} u(\tau) = & u_i e^{-\zeta \omega_n \tau} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D \tau + \cos \omega_D \tau \right) + \dot{u}_i e^{-\zeta \omega_n \tau} \left(\frac{1}{\omega_D} \sin \omega_D \tau \right) + \\ & \frac{p_i}{K_n} \left[1 - e^{-\zeta \omega_n \tau} \left(\cos \omega_D \tau + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D \tau \right) \right] + \\ & \frac{\Delta p_i}{K_n} \left[\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{2\zeta}{\omega_n \Delta t_i} + e^{-\zeta \omega_n \tau} \left(\frac{2\zeta^2 - 1}{\omega_D \Delta t_i} \sin \omega_D \tau + \frac{2\zeta}{\omega_n \Delta t_i} \cos \omega_D \tau \right) \right] \end{aligned} \quad (5.6)$$

E a velocidade da resposta da estrutura é dada por [18]:

$$\begin{aligned}
\dot{u}(\tau) = & -u_i e^{-\zeta\omega_n\tau} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\tau \right) + \dot{u}_i e^{-\zeta\omega_n\tau} \left(\cos \omega_D\tau - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\tau \right) + \\
& \frac{p_i}{K_n} e^{-\zeta\omega_n\tau} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\tau \right) + \\
& \frac{\Delta p_i}{K_n \Delta t_i} \left[1 - e^{-\zeta\omega_n\tau} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\tau + \cos \omega_D\tau \right) \right]
\end{aligned} \tag{5.7}$$

A utilização destas equações para $\tau = \Delta t_i$ fornece a resposta da estrutura u_{i+1} e a velocidade da resposta da estrutura \dot{u}_{i+1} no tempo t_{i+1} , através das equações 5.8 e 5.9, respectivamente, onde os parâmetros A, B, C, D, A', B', C' e D' são definidos de acordo com o apresentado na Tabela 5.10 [18].

$$u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1} \tag{5.8}$$

$$\dot{u}_{i+1} = A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1} \tag{5.9}$$

Tabela 5.10: Parâmetros de integração numérica com amortecimento

Parâmetro	Expressão
A	$e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t + \cos \omega_D\Delta t \right)$
B	$e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \sin \omega_D\Delta t \right)$
C	$\frac{1}{K_n} \left\{ \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{1-2\zeta^2}{\omega_D\Delta t} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \sin \omega_D\Delta t - \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \right) \cos \omega_D\Delta t \right] \right\}$
D	$\frac{1}{K_n} \left[1 - \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{2\zeta^2-1}{\omega_D\Delta t} \sin \omega_D\Delta t + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \cos \omega_D\Delta t \right) \right]$
A'	$-e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t \right)$
B'	$e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\cos \omega_D\Delta t - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t \right)$
C'	$\frac{1}{K_n} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \frac{\zeta}{\Delta t\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \sin \omega_D\Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos \omega_D\Delta t \right] \right\}$
D'	$\frac{1}{K_n\Delta t} \left[1 - e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \omega_D\Delta t + \cos \omega_D\Delta t \right) \right]$

A frequência amortecida, necessária para a definição dos parâmetros, é dada pela expressão:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5.10)$$

Para o caso de estudo é utilizado um sistema sem amortecimento, onde a equação de movimento é então dada pela expressão:

$$m \ddot{u} + k u = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (5.11)$$

A resposta da estrutura ao longo do tempo é, então, determinada através da seguinte expressão [18]:

$$u(\tau) = u_i \cos \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \sin \omega_n \tau + \frac{p_i}{K_n} (1 - \cos \omega_n \tau) + \frac{\Delta p_i}{K_n} \left(\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\sin \omega_n \tau}{\omega_n \Delta t_i} \right) \quad (5.12)$$

E a velocidade da resposta da estrutura é dada por [18]:

$$\frac{\dot{u}(\tau)}{\omega_n} = -u_i \sin \omega_n \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_n} \cos \omega_n \tau + \frac{p_i}{K_n} \sin \omega_n \tau + \frac{\Delta p_i}{K_n \omega_n \Delta t_i} (1 - \cos \omega_n \tau) \quad (5.13)$$

A utilização destas equações para $\tau = \Delta t_i$ fornece a resposta da estrutura u_{i+1} e a velocidade da resposta da estrutura \dot{u}_{i+1} no tempo t_{i+1} , através das equações 5.8 e 5.9, respectivamente, onde os parâmetros A , B , C , D , A' , B' , C' e D' são definidos de acordo com o apresentado na Tabela 5.11 [18].

Tabela 5.11: Parâmetros de integração numérica sem amortecimento

Parâmetro	Expressão
A	$\cos \omega_n \Delta t$
B	$\left(\frac{1}{\omega_n} \sin \omega_n \Delta t \right)$
C	$\frac{1}{K_n} \left[\frac{1}{\omega_n \Delta t} \sin \omega_n \Delta t - \cos \omega_n \Delta t \right]$
D	$\frac{1}{K_n} \left(1 - \frac{1}{\omega_n \Delta t} \sin \omega_n \Delta t \right)$
A'	$-\omega_n \sin \omega_n \Delta t$
B'	$\cos \omega_n \Delta t$
C'	$\frac{1}{K_n} \left(-\frac{1}{\Delta t} + \omega_n \sin \omega_n \Delta t + \frac{1}{\Delta t} \cos \omega_n \Delta t \right)$
D'	$\frac{1}{K_n \Delta t} (1 - \cos \omega_n \Delta t)$

Com o método a utilizar definido, resta determinar a matriz de rigidez generalizada e o vector das forças generalizadas.

Os elementos da matriz de rigidez generalizada são dados pela expressão (5.14), com a matriz a obter os valores apresentados em seguida:

$$\mathbf{K}_n = \phi_n^T K \phi_n \quad (5.14)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 802,86 & & \\ & 838,93 & \\ & & 3884,20 \end{bmatrix} [kN/m]$$

Por sua vez, o vector das forças generalizadas é obtido através da expressão (5.15).

$$\mathbf{F}(t) = \Phi p(t) \quad (5.15)$$

Um sistema com vários graus de liberdade pode ser representado por um sistema de equações desacopladas, também conhecidas como equações modais, onde cada equação se encontra então associada a um modo de vibração. A solução de cada equação representa a coordenada modal referente ao modo de vibração, como é o caso do resultado obtido através desta integração numérica, sendo então necessária uma sobreposição modal para obter a resposta real da estrutura, dada pela expressão (5.16).

$$u = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i \quad (5.16)$$

onde:

q_i é a coordenada modal i ;

ϕ_i é o modo de vibração i ;

u é a resposta real da estrutura.

As cargas devidas à acção do vento podem ser de pressão (coeficientes de pressão resultante positivos) ou de sucção (coeficientes de pressão resultante negativos). Dada esta situação, a estrutura é analisada para o caso mais gravoso de pressão e de sucção e obtidos os deslocamentos correspondentes.

No capítulo seguinte vai ser implementado um sistema de controlo através de cabos de pré-esforço activos, que tem como objectivo reduzir esses mesmos deslocamentos.

Sendo um sistema de controlo activo, como indicado no Capítulo 2, necessita de energia externa para o seu funcionamento. Desta forma, a estrutura tem que ser dimensionada para garantir a segurança

relativamente aos ELU's, como prevenção para o caso de falha na fonte de energia que alimenta o sistema de controlo. Assim, as acções são combinadas através da seguinte expressão [15]:

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k \quad (5.17)$$

onde:

E_d é a acção resultante da combinação das acções intervenientes na estrutura, denominada acção de dimensionamento;

G_k representa as acções permanentes na estrutura;

Q_k representa a acção variável do vento.

γ_G e γ_Q representam os coeficientes parciais relativos às acções permanentes e à acção variável do vento, respectivamente. Os valores a adoptar encontram-se na Tabela 5.12 [15].

Tabela 5.12: Coeficientes parciais relativos

Coeficiente	Acção favorável	Acção desfavorável
γ_G	1,00	1,35
γ_Q	0,00	1,50

5.5.1 Algoritmo para resolver a equação de movimento

Assim sendo, o algoritmo utilizado para resolver a equação de movimento e obter assim os deslocamentos da estrutura é apresentado em seguida:

1. Cálculos iniciais:

- a) Definição da matriz de rigidez e de massa
- b) Determinação das frequências naturais e respectivos modos de vibração
- c) Definição do intervalo de tempo Δt
- d) Definição da matriz de rigidez generalizada
- e) Determinação dos parâmetros de integração numérica A, B, C, D, A', B', C' e D'
- f) Para $t = 0$:
 - i. $u_0 = 0$
 - ii. $\dot{u}_0 = 0$

2. Cálculos para cada instante, t_i :

- a) $u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1}$
- b) $\dot{u}_{i+1} = A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1}$

- c) Sobreposição modal para obter a resposta real
3. Repetir o processo para o próximo instante de tempo. Alterar i para $i + 1$ e repetir o passo 2 para o próximo instante de tempo. Termina quando se atinge o tempo final.

5.5.2 Análise de resultados e verificação dos estados limites últimos

Efectuados os cálculos para a acção de dimensionamento determinada, a Tabela 5.13 resume os deslocamentos máximos obtidos para os casos de pressão e de sucção, ao nível do grau de liberdade u_2 , para as diferentes séries geradas.

Tabela 5.13: Deslocamentos máximos em u_2 [cm]

Série	Caso de pressão	Caso de sucção
1	4,24	5,19
2	4,19	5,52
3	4,68	4,83
4	4,24	4,77
5	4,20	4,63
6	3,78	5,21
7	4,13	5,36
8	3,94	5,57
9	3,77	5,08
10	4,36	6,62

Como referido, as verificações necessárias para garantir a segurança da estrutura serão efectuadas com os valores médios dos deslocamentos obtidos, apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Deslocamentos máximos médios em u_2 [cm]

Caso de pressão	Caso de sucção
4,15	5,28

As respectivas configurações deformadas apresentam-se nas Figuras 5.14(a) e 5.14(b).

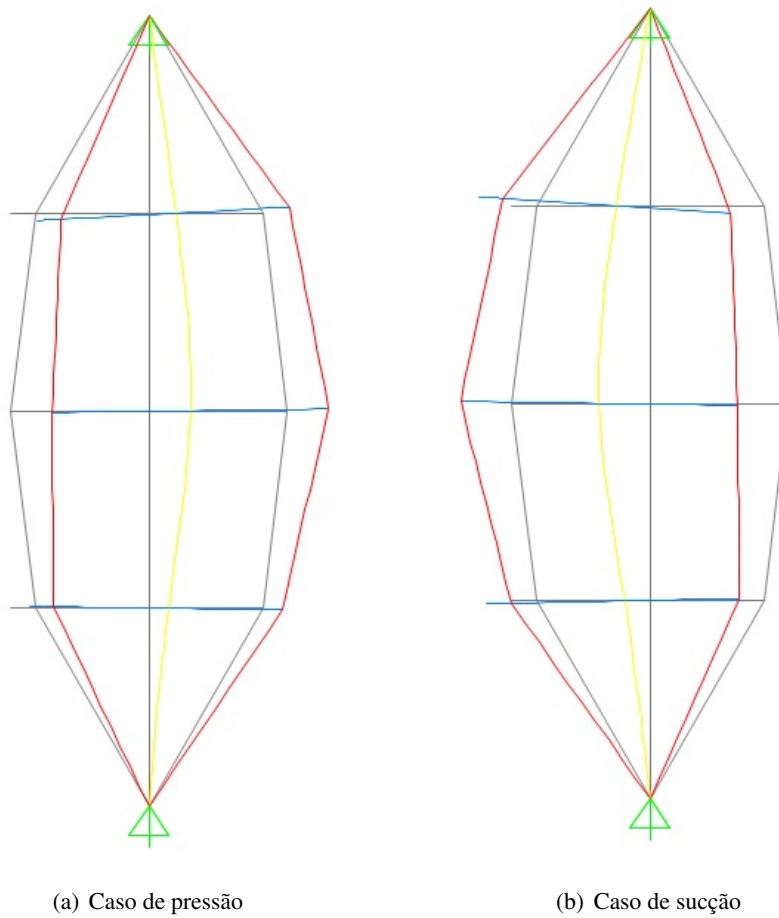


Figura 5.14: Configurações deformadas da estrutura (escala 10:1)

Como primeira análise, são analisados os esforços axiais para os dois casos e determinados os valores máximos e mínimos para os mesmos, como mostra a Tabela 5.15. A distribuição dos esforços encontra-se ilustrada na Figura 5.15.

Tabela 5.15: Esforços axiais máximos [kN]

Caso	Tracção			Compressão		
	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE
Pressão	36,38	14,33	0,51	-36,38	-14,33	-0,51
Sucção	45,20	18,19	0,51	-45,20	-18,19	-0,51

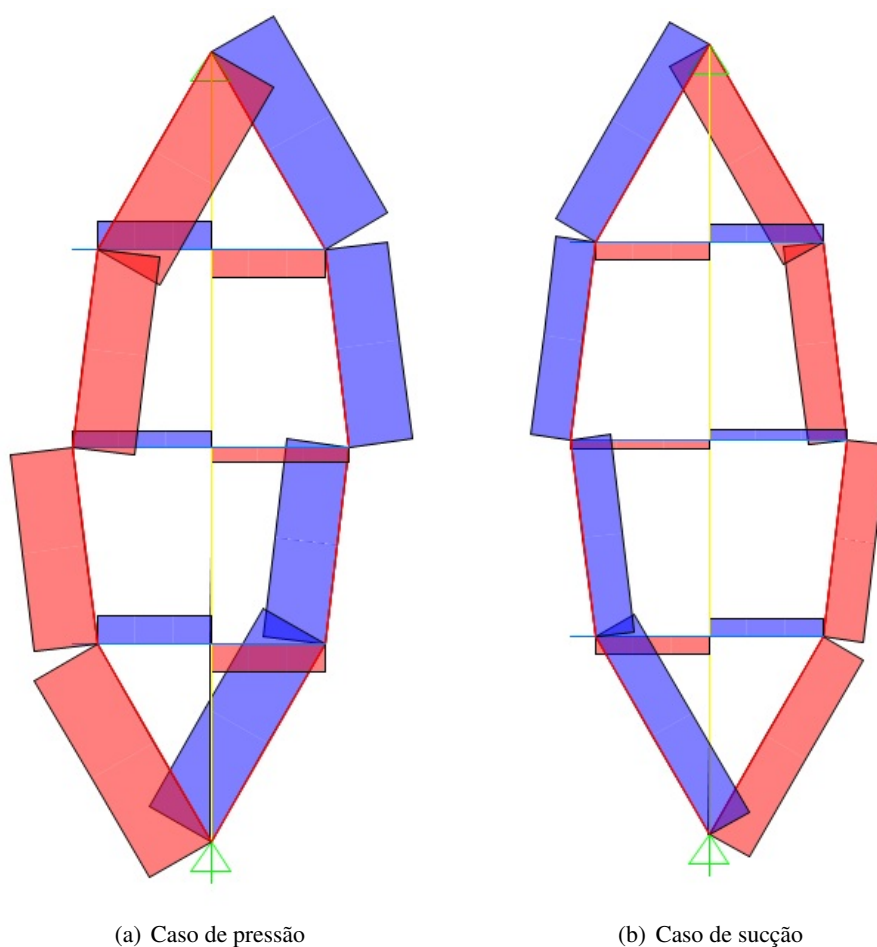


Figura 5.15: Distribuição de esforços axiais

Como os cabos não resistem à compressão, devem ser aplicadas forças de pré-tensão para garantir que os mesmos se encontrem sempre à tracção. Para tal acontecer, uma força de 45, 20 kN é aplicada nos cabos 1 e 2 (*cf.* Figura 5.16(a)) de forma a que todos os cabos se encontrem à tracção, como demonstram as Figuras 5.16(b) e 5.16(c). Na Tabela 5.16 apresentam-se os valores dos esforços axiais máximos após a aplicação da força de pré-tensão nos cabos.

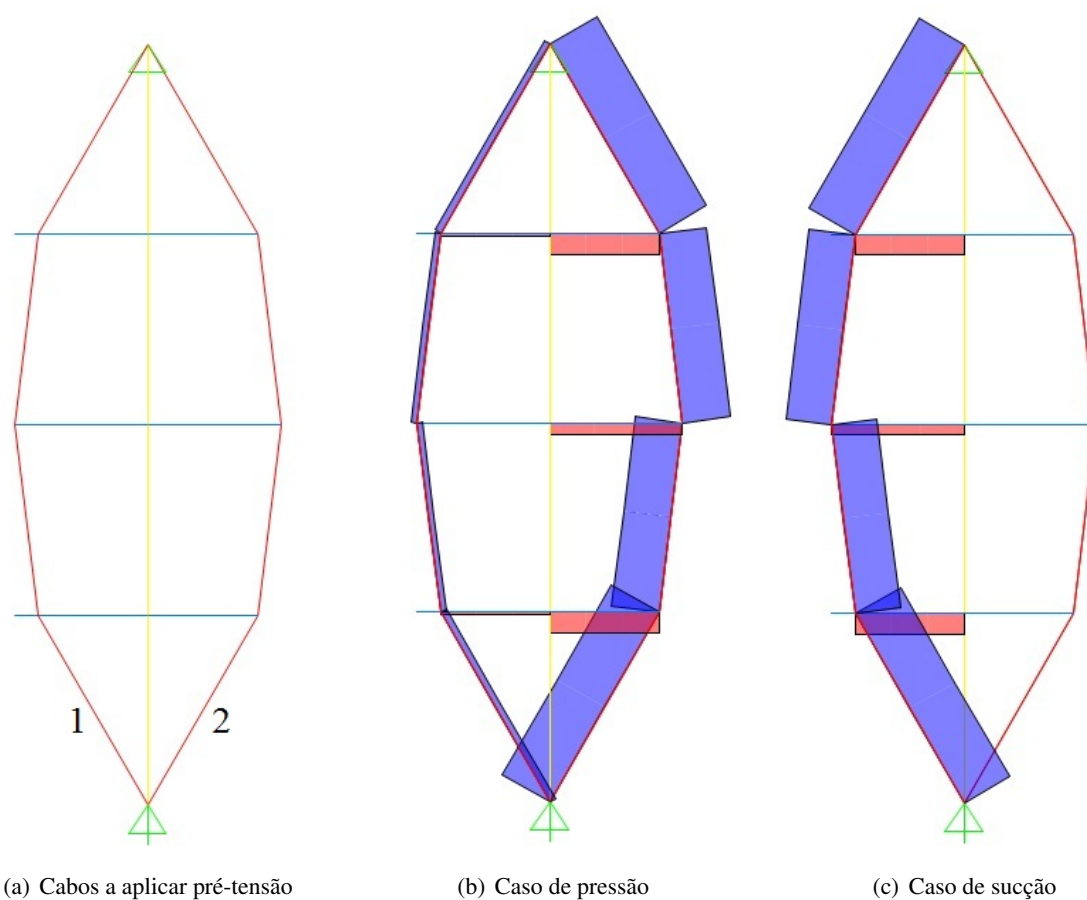


Figura 5.16: Aplicação de pré-tensão e distribuição de esforços axiais com pré-tensão aplicada

Tabela 5.16: Esforços axiais máximos após pré-tensão [kN]

Caso	Tração			Compressão		
	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE
Pressão	81,58	-	0,51	-	-32,52	-0,51
Sucção	90,40	-	0,51	-	-36,39	-0,51

Com recurso ao Anexo D, observa-se que o valor máximo que os cabos suportam é de 96 kN, encontrando-se assim verificada a segurança relativamente ao esforço axial nos cabos.

No perfil tubular, não tendo esforços de flexão, apenas é necessário efectuar a verificação da segurança relativamente ao esforço axial. No entanto, o perfil IPE necessita de verificações relativamente ao esforço transverso e ao momento flector, como mostram as Figuras 5.17 e 5.18 para os casos de pressão e sucção, respectivamente. Na Tabela 5.17 apresentam-se os esforços máximos obtidos para ambos os casos.

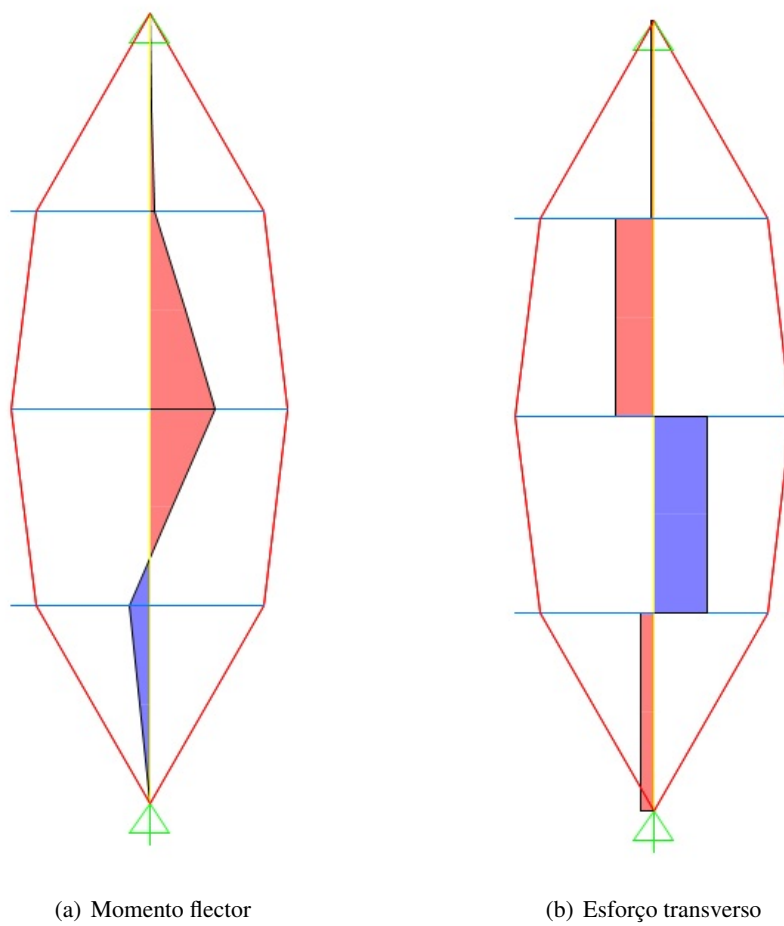


Figura 5.17: Esforços actuantes no perfil IPE - Caso de pressão

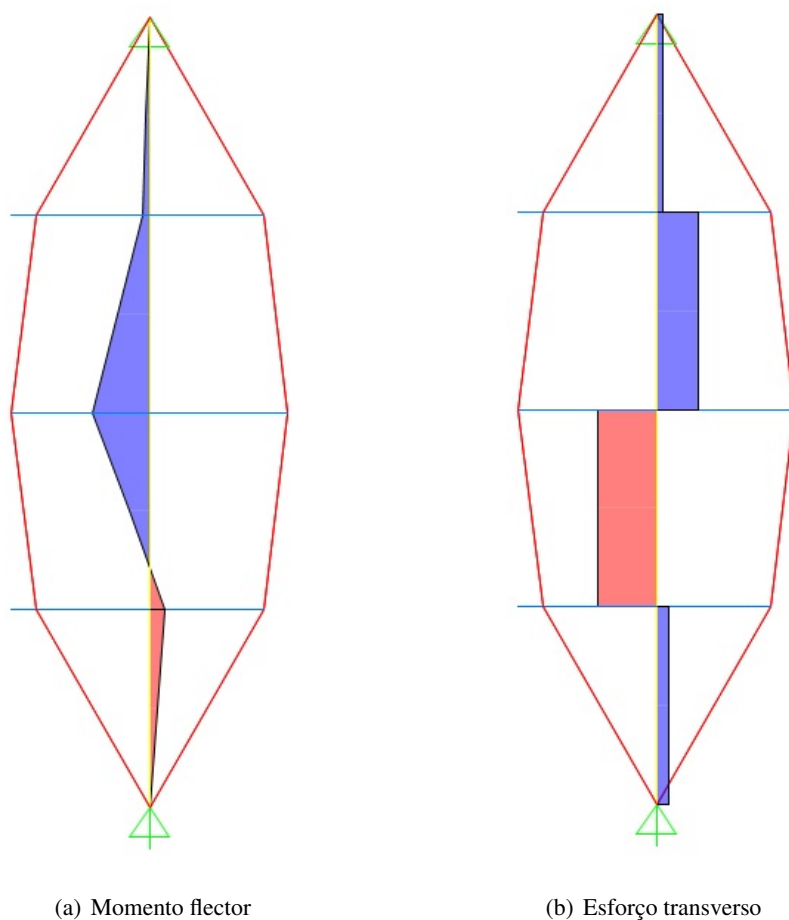


Figura 5.18: Esforços actuantes no perfil IPE - Caso de sucção

Tabela 5.17: Esforços máximos actuantes

Elemento	Sinal	Pressão			Sucção		
		N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]
Perfil tubular	Positivo	-	-	-	-	-	-
	Negativo	32,52	-	-	36,39	-	-
Perfil IPE	Positivo	0,51	5,31	10,98	0,51	19,08	8,33
	Negativo	0,51	16,65	7,71	0,51	4,88	11,98

Através do EC3 são efectuadas as verificações no perfil tubular e no perfil IPE, obtendo-se os esforços resistentes apresentados na Tabela 5.18 [17].

Tabela 5.18: Esforços resistentes

Elemento	N_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kNm]	V_{Rd} [kN]
Perfil tubular	54,32	-	-
Perfil IPE	583,27	31,36	121,57

Através dos dados das Tabelas 5.17 e 5.18, verifica-se a segurança relativamente aos ELU's para todos os elementos estruturais, uma vez que os esforços resistentes são superiores aos esforços actuantes.

Capítulo 6

Implementação do sistema de controlo activo

6.1 Introdução

Neste capítulo é estudada a resposta estrutural da fachada descrita no Capítulo 5 com a implementação de um sistema de controlo activo.

Inicialmente este sistema, composto por cabos de pré-esforço activos, efectuava o controlo estrutural unicamente através de leituras das deformações na estrutura, método que revelou ser pouco viável. Assim, optou-se pela utilização de sensores que estão aptos a medir as deformações na estrutura e a tensão instalada nos cabos, sendo através de um actuador efectuada a introdução de forças de compensação na estrutura [32].

Na secção 6.2 é definido o sistema de controlo a utilizar, assim como a interacção do actuador com a sintonização do PID.

Na secção 6.3 é definido o algoritmo para a introdução do PID no cálculo numérico.

Na secção 6.4 é aplicado o sistema de controlo na estrutura através do método de integração numérica definido no Capítulo 5, sendo posteriormente verificada a segurança relativamente aos ELU's.

Na secção 6.5 é efectuada uma comparação entre o comportamento da estrutura com e sem o sistema de controlo, para uma melhor compreensão dos benefícios que esta solução acarreta. Será ainda dimensionada, a título de comparação, uma segunda estrutura portante, sem controlo estrutural, que obtenha resultados semelhantes relativamente à estrutura inicial com sistema de controlo integrado.

6.2 Definição do actuador

Num sistema de controlo estrutural activo existem actuadores permanentes na estrutura que entram em funcionamento quando a mesma sofre consequências excessivas, derivadas das acções que se encontram em contacto com a mesma.

No presente caso em estudo, o sistema de controlo estrutural é composto por:

- Sensor colocado na estrutura ao nível do grau de liberdade u_2 para medir as deformações;
- Sensores colocados nos cabos para medirem a tensão instalada;
- Processador que analisa os valores lidos pelos sensores;
- Actuadores que são activados através do processador, se necessário, para alterarem a tensão instalada nos cabos e assim, serem reduzidas as deformações.

Relativamente aos actuadores utilizados neste sistema de controlo, considera-se a simplificação de alguns factores, nomeadamente:

- Assume-se uma resposta do actuador instantânea, não sendo contabilizado o atraso da resposta perante a solicitação a que a estrutura se encontra sujeita;
- Assume-se que as perdas derivadas da aplicação do pré-esforço são nulas;
- Assume-se que a velocidade da resposta do actuador e a intensidade da mesma não afectam a dinâmica da estrutura nem a sintonização do PID.

Uma vez que a tensão aplicada nos cabos se encontra directamente associada às deformações verificadas na estrutura, ao controlar a tensão instalada nos cabos, as deformações estão a ser automaticamente controladas. O processador para a análise dos dados e activação dos actuadores, é programado com uma acção de controlo PID, sendo a sua sintonização efectuada através do segundo método de Ziegler-Nichols [31, 48].

De uma forma simplificada, o sistema comporta-se da seguinte forma:

- 1) A acção dinâmica do vento atinge a estrutura;
- 2) Ocorre uma deformação da mesma e instala-se uma tensão nos cabos;
- 3) Os sensores medem esses valores;
- 4) O processador analisa os valores obtidos e compara-os com os valores de referência;
- 5) Caso o valor medido seja superior ao valor de referência, o sistema de controlo é activado através da introdução de tensões nos cabos para reduzirem a deformação da estrutura.

Como descrito no Capítulo 4, para efectuar uma sintonização do PID com o segundo método de Ziegler-Nichols, é necessário avaliar o comportamento do controlador apenas com uma acção de controlo proporcional. O ganho proporcional é incrementado até que a estrutura se torne instável, situação em que se atinge o ganho crítico, K_{cr} , com um correspondente período crítico, P_{cr} . O algoritmo utilizado para a introdução do PID no cálculo numérico é apresentado na secção seguinte.

6.3 Algoritmo para a introdução do PID no cálculo numérico

O algoritmo utilizado para a introdução do PID no cálculo numérico para o controlo das deformações da estrutura tem o seguinte procedimento:

1. Cálculos iniciais:

- a) Definição da matriz de rigidez e de massa
- b) Determinação das frequências naturais e respectivos modos de vibração
- c) Definição do intervalo de tempo Δt
- d) Definição da matriz de rigidez generalizada
- e) Determinação dos parâmetros de integração numérica A, B, C, D, A', B', C' e D'
- f) Definição dos valores de referência
- g) Para $t = 0$:
 - i. $u_0 = 0$
 - ii. $\dot{u}_0 = 0$
 - iii. Definição da derivada do erro para $t = 0$:

$$\frac{de(0)}{dt} = 0$$
 - iv. Definição do integral do erro para $t = 0$:

$$\int e(0) dt = 0$$

2. Sintonização do controlador

- a) Definição do valor inicial do ganho proporcional, K_p
- b) $T_i = \infty$
- c) $T_d = 0$
- d) Incremento de K_p até à instabilidade
 - i. Determinação de K_{cr}
 - ii. Determinação de P_{cr}
 - iii. Determinação de K_p
 - iv. Determinação de T_i
 - v. Determinação de T_d

3. Cálculos para cada instante, t_i :

- a) $u_{i+1} = Au_i + B\dot{u}_i + Cp_i + Dp_{i+1}$
- b) $\dot{u}_{i+1} = A'u_i + B'\dot{u}_i + C'p_i + D'p_{i+1}$
- c) Sobreposição modal para obter a resposta real
- d) Valor de deformação obtido pelo sensor *versus* Valor de referência
 - i. Deformação obtida \leq Deformação de referência
Sistema permanece inactivo.

- ii. Deformação obtida > Deformação de referência
Sistema de controlo iniciado.
 - e) Definição do erro
 $e(t_i) = \text{Tensão obtida nos cabos } (t_i) - \text{Tensão de referência}$
 - f) Definição da derivada do erro
 $\frac{de(t_i)}{dt} = \frac{e(t_i) - e(t_{i-1})}{\Delta t}$
 - g) Definição do integral do erro
 $\int e(t_i) dt = (e(t_i) + e(t_{i-1})) \times \frac{\Delta t}{2}$
 - h) Definição da resposta de controlo
 $u(t_i) = K_p e(t_i) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t_i) dt + K_p T_d \frac{de(t_i)}{dt}$
 - i) Aplicação da acção de controlo PID
 - j) Leitura das deformações e respectivas tensões nos cabos
4. Repetir o processo para o próximo instante de tempo. Alterar i para $i + 1$ e repetir o passo 3 para o próximo instante de tempo. Termina quando se atinge o tempo final.

6.4 Análise de resultados e verificação dos estados limites últimos

No passo 2 do algoritmo definido na secção 6.3, os parâmetros para a sintonização do controlador são definidos em função de uma acção de controlo proporcional. Para a acção do vento nos dois casos estudados, pressão e sucção, são obtidos os mesmos valores para os parâmetros em questão, apresentados em seguida na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Valores de K_{cr} , P_{cr} , K_p , T_i e T_d obtidos

Parâmetro	K_{cr}	P_{cr}	K_p	T_i	T_d
Valor	2,95	0,135	1,77	0,068	0,017

Assim, o sistema de controlo encontra-se sintonizado e pronto a utilizar, o que acontece no passo 3 d) ii., caso se verifique a condição imposta no algoritmo. Deste modo, para o caso estudado no Capítulo 5, o sistema de controlo é utilizado com o objectivo de reduzir as deformações da estrutura.

Assim sendo, com uma análise semelhante à do Capítulo 5, na Tabela 6.2 encontram-se os deslocamentos máximos obtidos para os casos de pressão e de sucção, ao nível do grau de liberdade u_2 , para as diferentes séries geradas.

Tabela 6.2: Deslocamentos máximos em u_2 com sistema de controlo activo [cm]

Série	Caso de pressão	Caso de sucção
1	1,00	1,83
2	0,81	1,32
3	0,86	1,08
4	1,00	1,20
5	1,48	1,07
6	0,94	1,23
7	0,79	1,54
8	1,08	1,89
9	1,25	0,89
10	1,17	1,75

De forma análoga, as verificações necessárias para garantir a segurança da estrutura serão efectuadas com os valores médios dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Deslocamentos médios em u_2 com sistema de controlo activo [cm]

Caso de pressão	Caso de sucção
1,04	1,38

As configurações deformadas referentes a estes casos encontram-se nas Figuras 6.1(a) e 6.1(b), respectivamente.

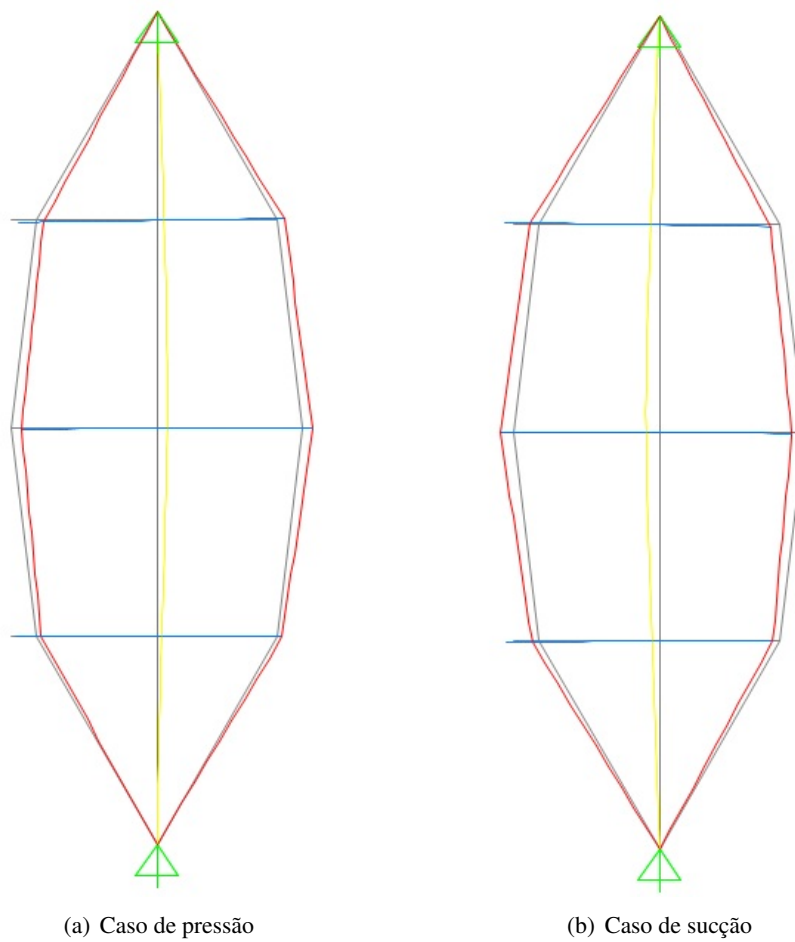


Figura 6.1: Configurações deformadas da estrutura com sistema de controlo activo (escala 10:1)

Nas Figuras 6.2 e 6.3 pode-se visualizar o desenvolvimento da tensão instalada nos cabos ao longo do tempo, para os dois casos analisados, devido à acção de controlo para uma das séries de vento geradas. Na Tabela 6.4 encontram-se os valores máximos obtidos da tensão instalada nos cabos para os casos de pressão e sucção, derivados da média das diferentes séries.

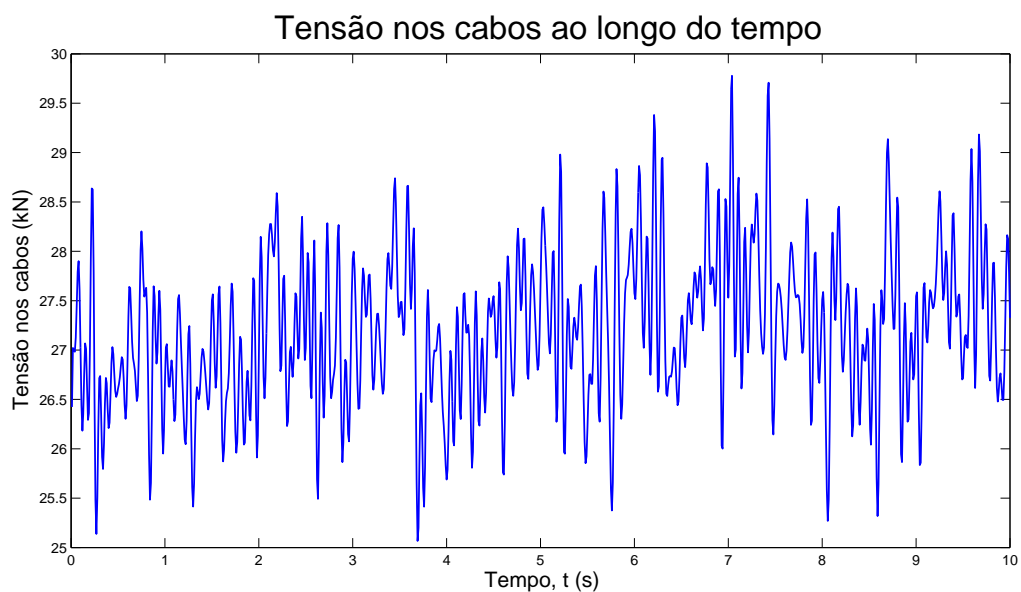


Figura 6.2: Tensão instalada nos cabos devido à acção de controlo - Pressão

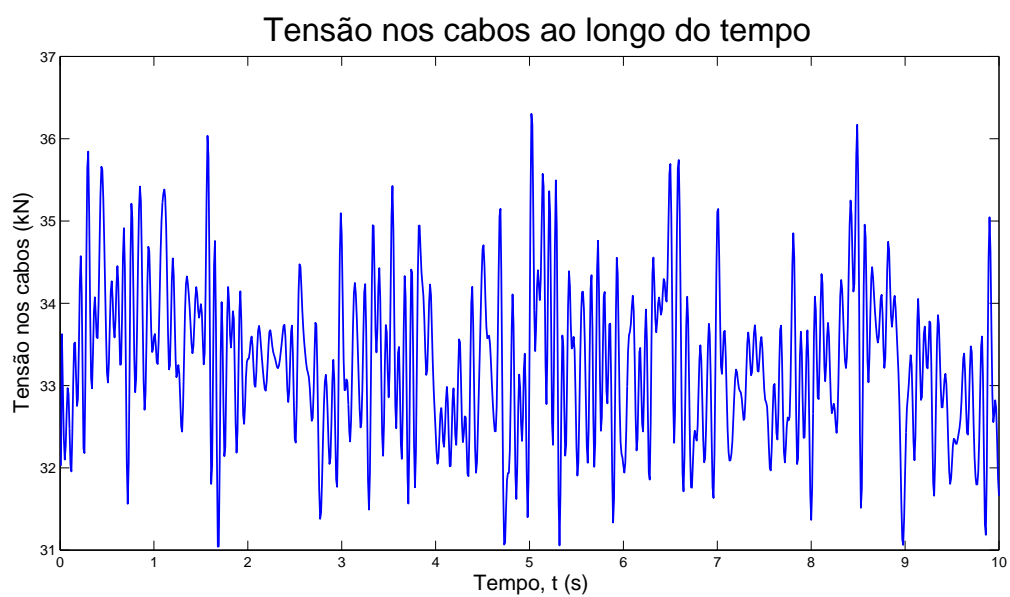


Figura 6.3: Tensão instalada nos cabos devido à acção de controlo - Sucção

Tabela 6.4: Tensão máxima instalada nos cabos [kN]

Caso de pressão	Caso de sucção
27,72	34,30

Caso o sistema de controlo seja activado, a pré-tensão inicial introduzida para evitar a compressão nos cabos será também controlada pelo sistema. Para avaliar o valor da mesma, são consideradas apenas as

tensões derivadas da acção de controlo e da acção do vento. Uma vez que a pré-tensão é controlada pelo sistema, não há necessidade de aplicar o mesmo valor para os casos de pressão e sucção, sendo estes casos considerados em separado. Nas Figuras 6.4(a) e 6.4(b) ilustram-se as distribuições de esforços axiais para os casos de pressão e sucção, respectivamente. Na Tabela 6.5 encontram-se os valores máximos e mínimos para ambos os casos.

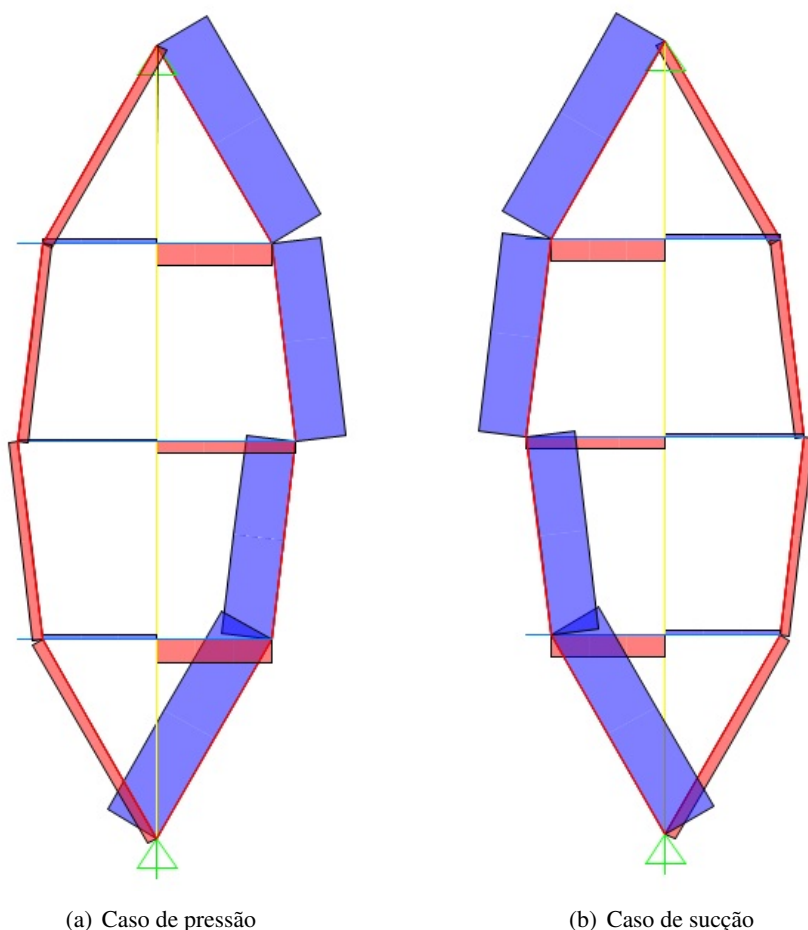


Figura 6.4: Distribuição de esforços axiais, sem pré-tensão, com sistema de controlo activo

Tabela 6.5: Esforços axiais máximos com sistema de controlo activo [kN]

Caso	Tracção			Compressão		
	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE
Pressão	64,10	4,72	0,51	-11,98	-25,24	-0,51
Sucção	79,50	6,30	0,51	-16,00	-31,70	-0,51

Como referido, a tensão a aplicar nos cabos para estes se encontrarem todos à tracção é distinta para os casos de pressão e sucção. Através da Tabela 6.5, identificam-se os valores de pré-tensão a aplicar nos referidos casos. Assim, a pré-tensão será aplicada nos cabos indicados na Figura 5.16(a), com um valor de 11,98 kN para o caso de pressão e de 16,00 kN para o caso de sucção.

Na Figura 6.5 ilustra-se a distribuição de esforços axiais na estrutura, com a ausência de compressões nos cabos, com os valores máximos e mínimos para os casos estudados a serem apresentados na Tabela 6.6.

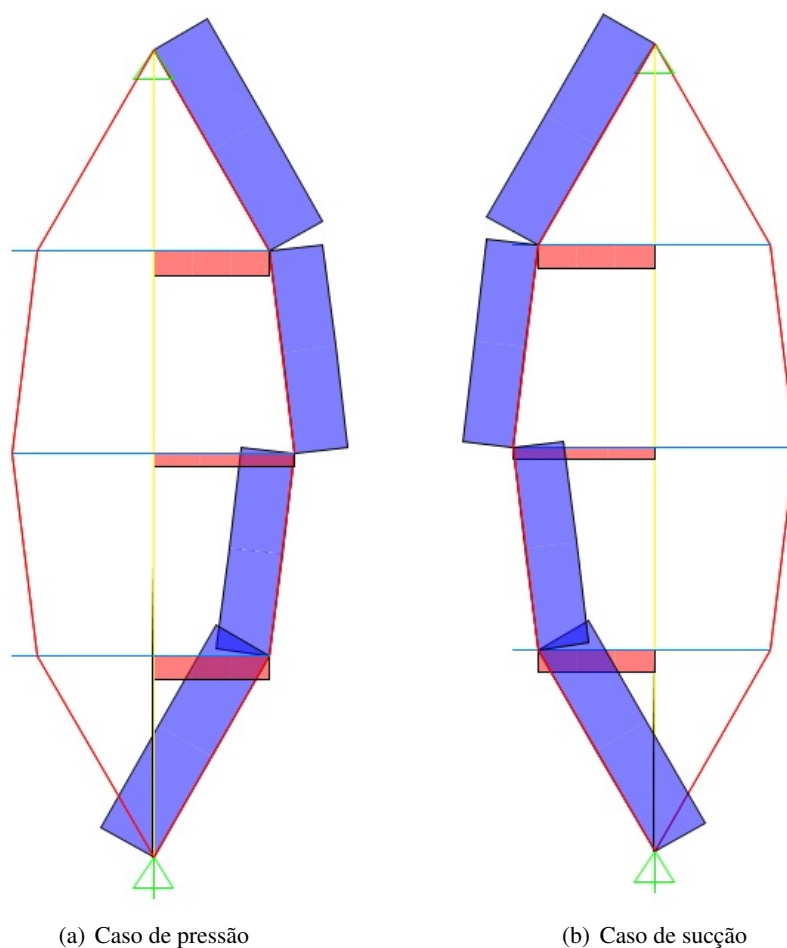


Figura 6.5: Distribuição de esforços axiais, com pré-tensão, com sistema de controlo activo

Tabela 6.6: Esforços axiais máximos, com pré-tensão, com sistema de controlo activo [kN]

Caso	Tracção			Compressão		
	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE	Cabo	Perfil tubular	Perfil IPE
Pressão	76,08	-	0,51	-	-29,96	-0,51
Sucção	95,50	-	0,51	-	-38,00	-0,51

Como referido no Capítulo 5, o valor máximo que os cabos suportam é de 96 kN, encontrando-se assim verificada a segurança relativamente ao esforço axial.

Novamente, no perfil tubular apenas a verificação ao esforço axial é necessária, sendo, no entanto, necessária a verificação ao esforço transversal e ao momento flector no perfil IPE [17]. Nas Figuras

6.6 e 6.7 apresentam-se as distribuições dos esforços para os casos de pressão e sucção, respectivamente, com os valores máximos obtidos para ambos os casos apresentados na Tabela 6.7.

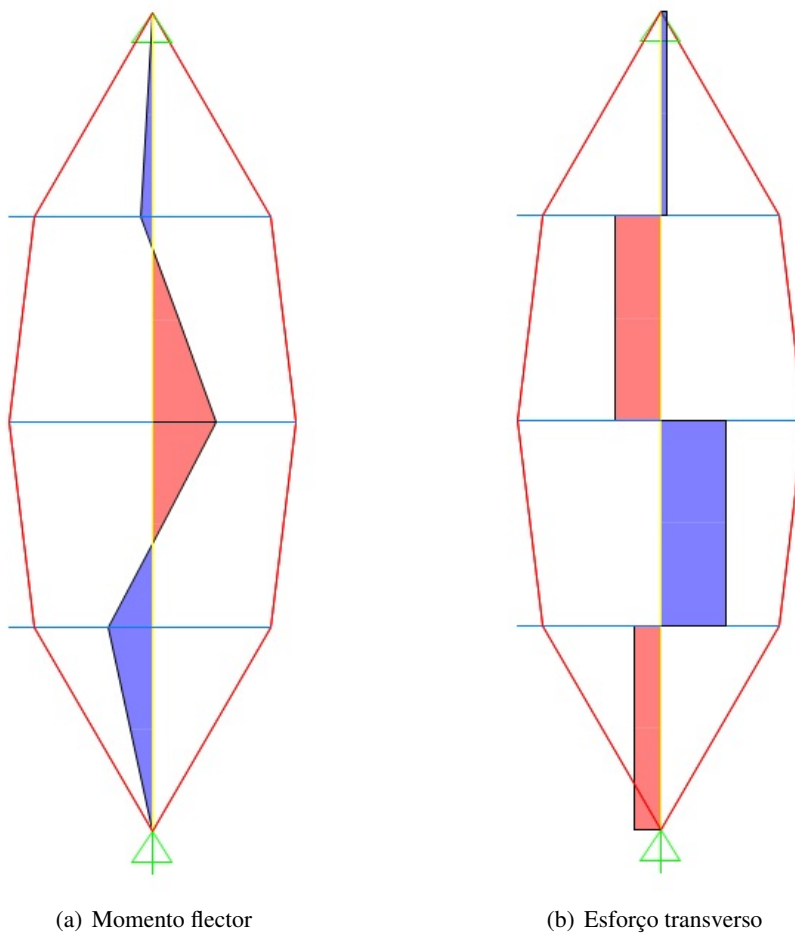


Figura 6.6: Esforços actuantes no perfil IPE com sistema de controlo activo - Caso de pressão

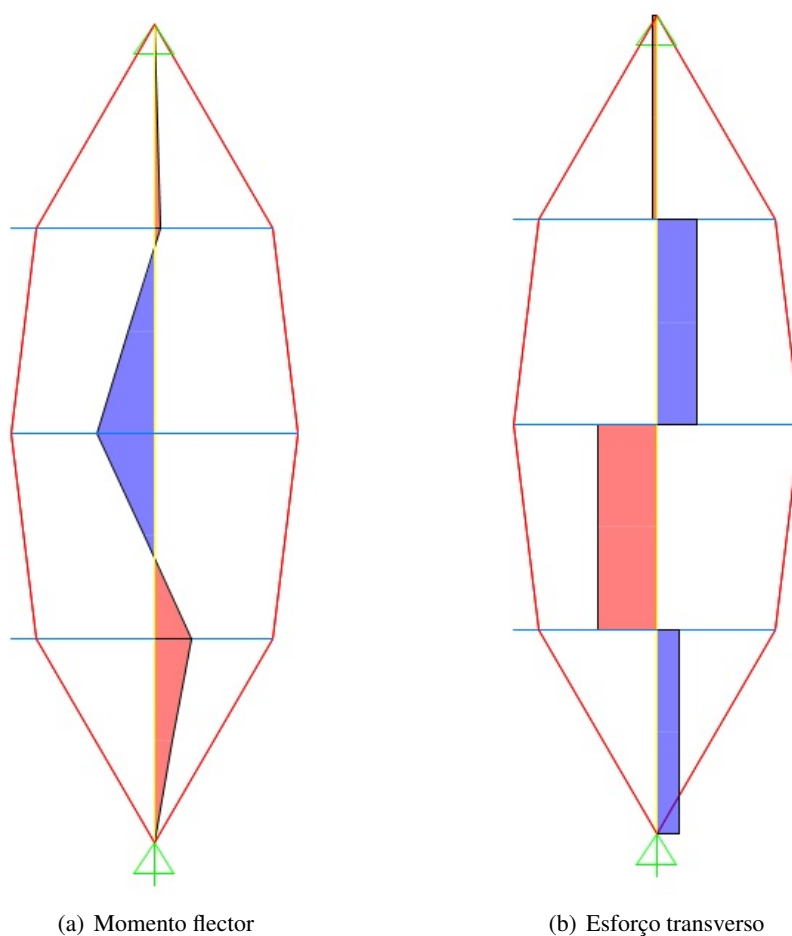


Figura 6.7: Esforços actuantes no perfil IPE com sistema de controlo activo - Caso de sucção

Tabela 6.7: Esforços máximos actuantes com sistema de controlo activo

Elemento	Sinal	Pressão			Sucção		
		N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]	N_{Ed} [kN]	M_{Ed} [kNm]	V_{Ed} [kN]
Perfil tubular	Positivo	-	-	-	-	-	-
	Negativo	29,96	-	-	38,00	-	-
Perfil IPE	Positivo	0,51	8,62	10,63	0,51	14,10	7,36
	Negativo	0,51	12,63	7,71	0,51	8,98	11,98

Através dos dados das Tabelas 6.7 e 5.18, verifica-se a segurança relativamente aos ELU's para todos os elementos estruturais, uma vez que os esforços resistentes são superiores aos esforços actuantes.

6.5 Sistema inactivo versus Sistema activo

Os resultados obtidos conduziram a uma elevada redução das deformações existentes na estrutura, como é possível verificar nas Figuras 6.8 e 6.9 para os casos de pressão e sucção, respectivamente, para uma

das séries de vento geradas. Nas Tabelas 6.8 e 6.9 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para os casos de pressão e sucção, respectivamente.

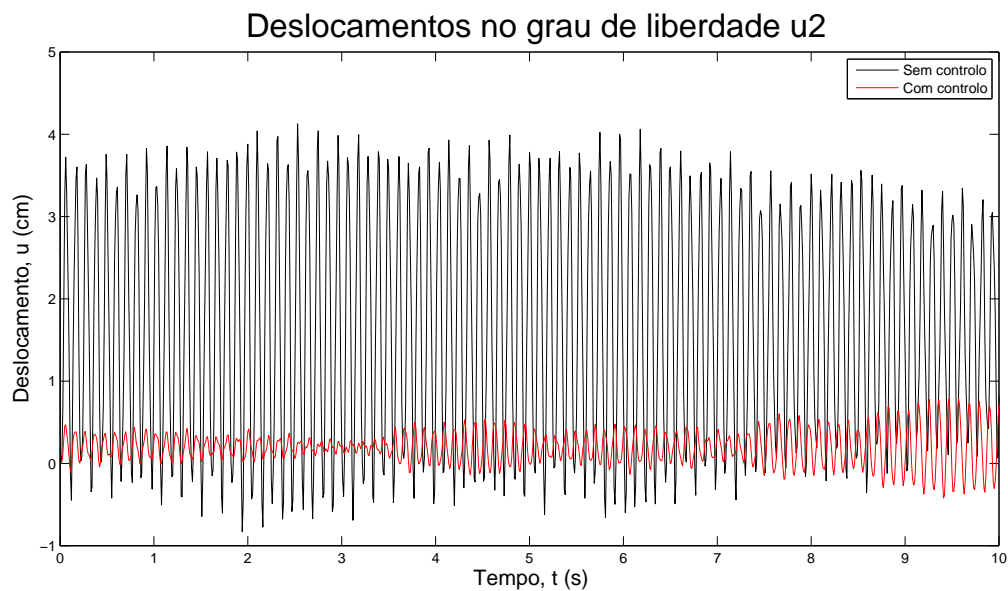


Figura 6.8: Deslocamentos no grau de liberdade u_2 para o caso de pressão

Tabela 6.8: Comparação de resultados no caso de pressão

Situação de controlo	u_2 [cm]	Redução de u_2 [%]
Controlo inactivo	4,15	74,9
Controlo activo	1,04	

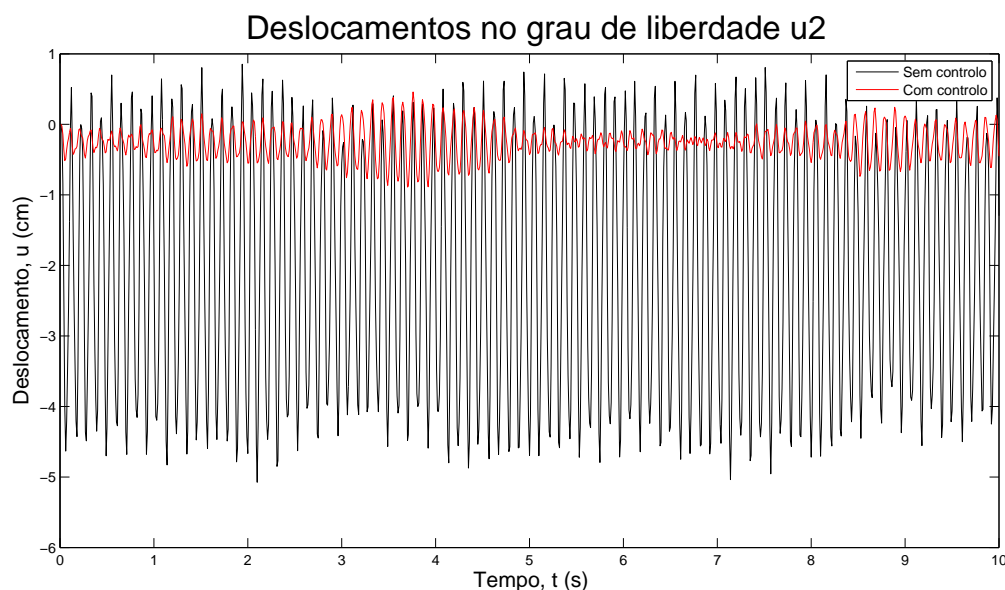


Figura 6.9: Deslocamentos no grau de liberdade u_2 para o caso de sucção

Tabela 6.9: Comparação de resultados no caso de sucção

Situação de controlo	u_2 [cm]	Redução de u_2 [%]
Controlo inactivo	5,28	73,9
Controlo activo	1,38	

6.5.1 Estrutura equivalente sem controlo estrutural

Nesta secção é estudada, a título de exemplo, uma estrutura, sem controlo, que consiga obter deslocamentos próximos da solução obtida com controlo activo. Após várias tentativas, a estrutura portante da fachada, que obtém resultados semelhantes à estrutura inicialmente estudada, é constituída por perfis HEB 260 ao invés de perfis IPE 140, sendo os restantes elementos estruturais idênticos.

Utilizado o algoritmo definido na secção 5.5.1, na Tabela 6.10 encontram-se os deslocamentos máximos obtidos, ao nível do grau de liberdade u_2 , para os casos de pressão e sucção, para as diferentes séries de vento geradas. Por sua vez, na Tabela 6.11 encontram-se os deslocamentos máximos médios, utilizados para comparação com os deslocamentos da estrutura com sistema de controlo activo.

Tabela 6.10: Deslocamentos máximos em u_2 para estrutura com perfil HEB 260 [cm]

Série	Caso de pressão	Caso de sucção
1	1,12	1,28
2	1,15	1,39
3	1,07	1,48
4	1,12	1,29
5	1,04	1,33
6	1,20	1,30
7	1,21	1,61
8	1,14	1,55
9	1,18	1,47
10	1,62	1,35

Tabela 6.11: Deslocamentos médios em u_2 para estrutura com perfil HEB 260 [cm]

Caso de pressão	Caso de sucção
1,18	1,41

As respectivas configurações deformadas apresentam-se nas Figuras 6.10(a) e 6.10(b).

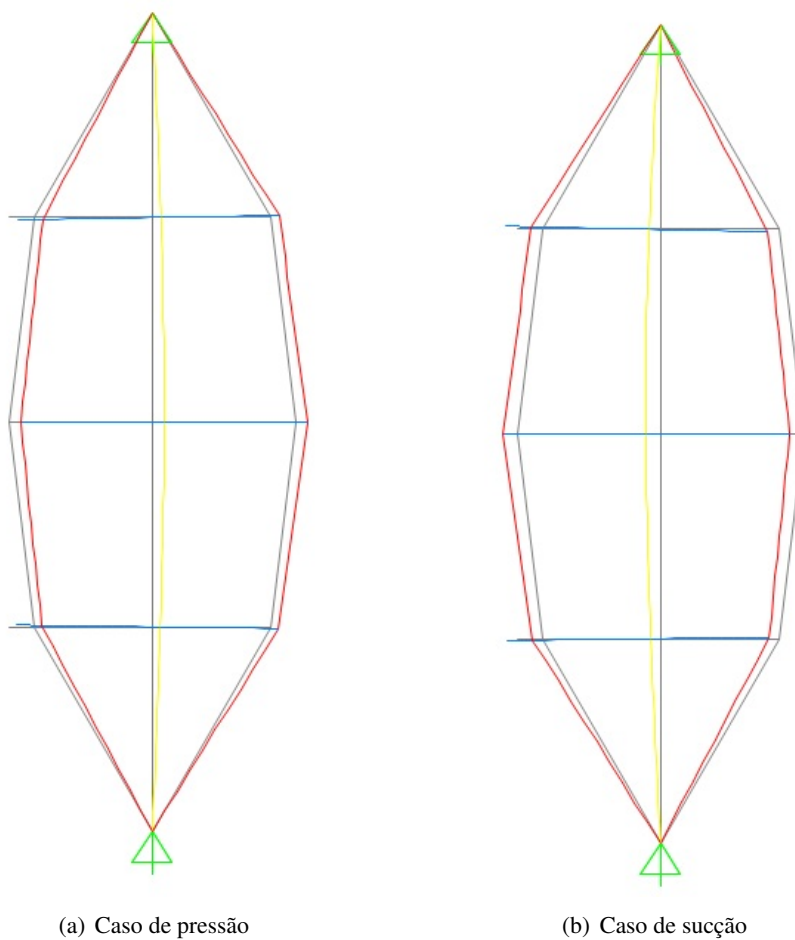


Figura 6.10: Configurações deformadas da estrutura composta por perfis HEB 260 (escala 10:1)

Na Tabela 6.12 encontra-se um resumo dos deslocamentos obtidos com a estrutura constituída com perfis IPE, com e sem sistema de controlo activo, e constituída com perfis HEB.

Tabela 6.12: Deslocamentos médios em u_2 para os diferentes casos estudados [cm]

Estrutura	Caso											
	Pressão						Sucção					
	u_2			Δu_2 [%]			u_2			Δu_2 [%]		
IPE inactivo	4,15	✓		✓		-	5,28	✓		✓		-
IPE activo	1,04	✓	74,9	-	71,6	✓	13,5	1,38	✓	73,9	-	73,3 ✓ 2,2
HEB inactivo	1,18	-		✓		✓	1,41	-		✓		✓

Capítulo 7

Conclusões e considerações finais

7.1 Apreciação global e conclusões

A presente dissertação teve como principal objectivo o estudo da implementação de um sistema de controlo estrutural activo, composto por cabos de pré-esforço, numa fachada em vidro estrutural de um edifício. A utilização deste sistema, além de possibilitar uma elevada redução das deformações impostas na estrutura, possibilita uma redução nos materiais utilizados, o que influencia os custos associados dos mesmos.

Um exemplo dessa possibilidade de redução é baseada na comparação entre a estrutura portante composta com o sistema de controlo e a estrutura portante composta por perfis HEB 260. Fornecem resultados muito próximos, porém, a solução composta por perfis HEB 260 torna a estrutura portante cerca de sete vezes mais pesada, tornando-se bastante dispendiosa no que diz respeito aos materiais utilizados.

É também importante referir que este sistema de controlo necessita de uma fonte de energia externa para ser activado, o que implica a existência de um gerador dedicado, com todos os seus inconvenientes relativamente ao custo, para o caso de falha na energia eléctrica.

Devido a estes factores, a utilização de um sistema de controlo estrutural com cabos de pré-esforço activos deve ser estudada em pormenor, de modo a fazer o balanço entre as vantagens e desvantagens inerentes.

7.2 Perspectivas para aplicações e desenvolvimentos futuros

A área científica na qual se insere a presente dissertação possui várias abordagens e distintos caminhos por onde se pode envergar, pelo que se sugere:

- Aplicação do sistema de controlo em fachadas com uma altura total mais elevada;
- Aplicação do sistema de controlo em qualquer estrutura, cujo principal sistema de suporte sejam cabos;
- Aplicação do sistema de controlo incluindo o modelo dinâmico do actuador utilizado;
- Análise de casos experimentais para um estudo mais aprofundado deste tipo de solução estrutural.

Bibliografia

- [1] <http://pt.saint-gobain-glass.com>. Acedido a 26 de Agosto de 2012.
- [2] <http://www.vidrado.com>. Acedido a 4 de Julho de 2012.
- [3] <http://luizandrino.wordpress.com>. Acedido a 4 de Julho de 2012.
- [4] <http://www.arquitetonico.ufsc.br>. Acedido a 16 de Agosto de 2012.
- [5] <http://www.mrva.net>. Acedido a 04 de Agosto de 2012.
- [6] <http://www.vasgon.com/pt>. Acedido a 27 de Agosto de 2012.
- [7] <http://www.ovidroplano.com.br>. Acedido a 18 de Setembro de 2012.
- [8] <http://www.mmaluminios.pt>. Acedido a 28 de Agosto de 2012.
- [9] <http://www.fitechnic.com>. Acedido a 28 de Agosto de 2012.
- [10] <http://www.vidroimpresso.com.br/>. Acedido a 28 de Agosto de 2012.
- [11] Balkow, D., Schittich, C., Schuler, M., Sobek, W., and Staib, G. *Glass Construction Manual*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH, Birkhäuser, 1999. ISBN 3-7643-6077-1.
- [12] Bossanyi, E., Burton, T., Jenkins, N., and Sharpe, D. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2001. ISBN 0-471-48997-2.
- [13] Bryson, A. and Ho, Y. *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*. Hemisphere Publishing, 1975.
- [14] Carvalho, J. L. Martins de. *Dynamical Systems and Automatic Control*. Prentice-Hall, Inc., Novembro 1993. ISBN 0132217554.
- [15] CEN. *NP EN 1990 2009. Eurocódigo - Bases para o projecto de estruturas*. Instituto Português da Qualidade, Dezembro 2009.
- [16] CEN. *NP EN 1991-1-4 2010. Eurocódigo 1 - Acções em estruturas. Parte 1-4: Acções gerais. Acções do vento*. Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [17] CEN. *NP EN 1993-1-1 2010. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [18] Chopra, A.K. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics. Prentice-Hall, Inc., 1995. ISBN 0-13-855214-2.

- [19] Cismasiu, I. *Apontamentos da disciplina de Análise de Estruturas II*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [20] Dyke, S.J., Spencer, B.F., Sain, J.M.K., and Carlson, J.D. Experimental verification of semi-active structural control strategies using acceleration feedback. *Proc. 3rd Int. Conf. on Motion and Vib. Control*, Chiba, Japan, vol. III:291–296, 1996.
- [21] Gawronski, W.K. *Dynamics and Control of Structures. A Modal Approach*. Springer-Verlag New York, Inc., 1998. ISBN 0387985271.
- [22] Gilat, A. *MATLAB com aplicações em engenharia*. Bookman, segunda edição, 2006. ISBN 978-85-363-0692-6.
- [23] Guerreiro, L. *Acção Sísmica - Texto de apoio à disciplina de Engenharia Sísmica de Pontes do Mestrado em Engenharia de Estruturas*. Instituto Superior Técnico, Fevereiro 2011.
- [24] Haugen, F. *The Good Gain method for PI(D) controller tuning*. Julho 2010.
- [25] Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T.P. Structural control: Past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9):897–971, 1997.
- [26] Kuo, B.C. *Automatic Control Systems*. John Wiley & Son's, Inc., 8th edition, 2002. ISBN 0471134767.
- [27] Lewis, F.L. *Applied Optimal Control and Estimation*. Prentice-Hall, 1992.
- [28] Moura, A. *Fachadas em Vidro Exterior Agrafado*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Maio 2005.
- [29] Moutinho, C. *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil*. Ph.D. thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Agosto 2007.
- [30] Nise, N.S. *Control Systems Engineering*. John Wiley & Son's, Inc, 2000.
- [31] Ogata, K. *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, 3rd edition, 1997. ISBN 0-13-261389-1.
- [32] Pacheco, P. *Pré-esforço orgânico - Um exemplo de sistema efector*. Ph.D. thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dezembro 1999.
- [33] Patterson, M. *Structural Glass Facades: A Unique Building Technology*. Master's thesis, Faculty of the School of Architecture of University of Southern California, Maio 2008.
- [34] Pereira, S. *Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Março 2012.
- [35] Reinhorn, A.M., Soong, T.T., and Wen, C.Y. Base-isolated structures with active control. *Proc. ASME PVP Conf.*, San Diego, California, PVP-127:413–420, 1987.
- [36] Ribeiro, F. *Análise de Robustez de Estruturas Sujeitas a Eventos Sísmicos Consecutivos*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Dezembro 2011.
- [37] Santos, F. *Apontamentos da disciplina de Tems de Estruturas*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

- [38] Santos, F. *Vibration control with shape-memory alloys in civil engineering structures*. Ph.D. thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Março 2011.
- [39] Serafim, P. *Controlo de Vibrações em Engenharia Civil - Caso de Estudo: Aplicação de Ligas de SMA na Ponte de Santa Margarida do Sado*. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Setembro 2011.
- [40] Shiba, K., Tamura, K., Inada, Y., and Yamaura, N. Vibration control characteristics of a hybrid mass dampers system through earthquake observation records of a tall building. *Proc. 1st World Conf. on Struct. Control*, Los Angeles, California:WP2:80–89, Agosto 1994.
- [41] Sólnes, J. *Stochastic Processes and Random Vibrations*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 1997.
- [42] Soong, T.T. and Constantinou, M.C. *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engrg.* Springer-Verlag, Wien and New York, 1994.
- [43] Soong, T.T. and Reinhorn, A.M. An overview of active and hybrid structural control research in the u.s. *The Struct. Dyn. Design of Tall Buildings*, 2:192–209, 1993.
- [44] Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S. State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7):845–856, 2009.
- [45] Spencer, B.F. and Sain, M.K. Controlling buildings: A new frontier in feedback. *Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology*, 17(6):19–35, 1997.
- [46] Symans, M.D. and Constantinou, M.C. Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21:469–487, 1999.
- [47] Valarinho, L. *Construção em vidro estrutural - Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2010.
- [48] Ziegler, J.G. and Nichols, N.B. *Optimum Settings for Automatic Controllers*, pages 759–768. ASME Trans., 1942.

Apêndice A

Normas de concepção e utilização do vidro

Tabela A.1: Principais normas de concepção e utilização do vidro [47]

Norma	Especificação da norma
EN 572-1: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 572-2: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float glass
EN 572-3: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 3: Polished wire glass
EN 572-4: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 4: Drawn sheet glass
EN 572-5: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 5: Patterned glass
EN 572-6: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 6: Wired patterned glass
EN 572-7: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 7: Wired or unwired channel shaped glass
EN 572-8: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 8: Supplied and final cut sizes
EN 572-9: 2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 9: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1748-1-1: 2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-1-2: 2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1748-2-1: 2004	Special basic products - Glass ceramics - Part 2-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-2-2: 2004	Special basic products - Glass ceramics - Part 2-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1051-1: 2003	Glass blocks and glass paver units - Part 1: Definitions and description
EN 1051-2: 2003	Glass blocks and glass paver units - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1863-1: 2000	Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN 1863-2: 2004	Heat strengthened soda lime silicate glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12150-1: 2000	Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 12150-2: 2000	Thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard

Tabela A.1: Principais normas de concepção e utilização do vidro (continuação) [47]

Norma	Especificação da norma
EN 14179-1: 2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14179-2: 2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 13024-1: 2002	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 13024-2: 2004	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 14321-1: 2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14321-2: 2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12337-1: 2000	Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN 12337-2: 2004	Chemically strengthened soda lime silicate glass - Part 2: Evaluation and conformity/Product standard
EN 1096-1: 1998	Coated glass - Part 1: Definition and classification
EN 1096-2: 2001	Coated glass - Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings
EN 1096-3: 2001	Coated glass - Part 3: Requirements and test methods for class C and D coatings
EN 1096-4: 2004	Coated glass - Part 4: Evaluation of conformity/Product standard
ISO 12543-1: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 1: Definitions and description of component parts
ISO 12543-2: 2004	Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass
ISO 12543-3: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 3: Laminated glass
ISO 12543-4: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 4: Test methods for durability
ISO 12543-5: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 5: Dimensions and edge finishing
ISO 12543-6: 1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 6: Appearance
EN 14449: 2005	Laminated glass and laminated safety glass - Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-1: 2004	Insulating glass units - Part 1: Generalities, dimensional tolerances and rules for the system description
EN 1279-2: 2002	Insulating glass units - Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration
EN 1279-3: 2002	Insulating glass units - Part 3: Long term test method and requirements for gas leakage rate and for gas concentration tolerances
EN 1279-4: 2002	Insulating glass units - Part 4: Methods for test for the physical attributes of edge seals
EN 1279-5: 2005	Insulating glass units - Part 5: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-6: 2002	Insulating glass units - Part 6: Factory production control and periodic tests

Apêndice B

Catálogo de perfis IPE e HE

Poutrelles I européennes

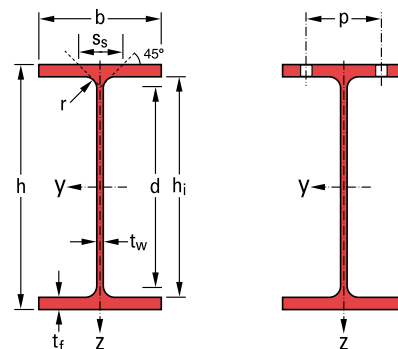
IPE 100 - 600 conformes à l'Euronorme 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750

European I beams

IPE 100 - 600 in accordance with Euronorm 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750

Europäische I-Profile

IPE 100 - 600 gemäß Euronorm 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750



Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A cm ²	h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
IPE A 100•	6.9	98	55	3.6	4.7	7	8.78	88.6	74.6	-	-	-	0.397	57.57
IPE 100	8.1	100	55	4.1	5.7	7	10.32	88.6	74.6	-	-	-	0.400	49.33
IPE A 120•	8.7	117.6	64	3.8	5.1	7	11.03	107.4	93.4	-	-	-	0.472	54.47
IPE 120	10.4	120	64	4.4	6.3	7	13.21	107.4	93.4	-	-	-	0.475	45.82
IPE A 140•	10.5	137.4	73	3.8	5.6	7	13.39	126.2	112.2	-	-	-	0.547	52.05
IPE 140	12.9	140	73	4.7	6.9	7	16.43	126.2	112.2	-	-	-	0.551	42.70
IPE A 160•	12.7	157	82	4	5.9	9	16.18	145.2	127.2	-	-	-	0.619	48.70
IPE 160	15.8	160	82	5	7.4	9	20.09	145.2	127.2	-	-	-	0.623	39.47
IPE A 180•	15.4	177	91	4.3	6.5	9	19.58	164	146	M10	48	48	0.694	45.15
IPE 180	18.8	180	91	5.3	8	9	23.95	164	146	M10	48	48	0.698	37.13
IPE O 180 ⁺	21.3	182	92	6	9	9	27.10	164	146	M10	50	50	0.705	33.12
IPE A 200•	18.4	197	100	4.5	7	12	23.47	183	159	M10	54	58	0.764	41.49
IPE 200	22.4	200	100	5.6	8.5	12	28.48	183	159	M10	54	58	0.768	34.36
IPE O 200 ⁺	25.1	202	102	6.2	9.5	12	31.96	183	159	M10	56	60	0.779	31.05
IPE A 220•	22.2	217	110	5	7.7	12	28.26	201.6	177.6	M12	60	62	0.843	38.02
IPE 220	26.2	220	110	5.9	9.2	12	33.37	201.6	177.6	M12	60	62	0.848	32.36
IPE O 220 ⁺	29.4	222	112	6.6	10.2	12	37.39	201.6	177.6	M10	58	66	0.858	29.24
IPE A 240•	26.2	237	120	5.2	8.3	15	33.31	220.4	190.4	M12	64	68	0.918	35.10
IPE 240	30.7	240	120	6.2	9.8	15	39.12	220.4	190.4	M12	66	68	0.922	30.02
IPE O 240 ⁺	34.3	242	122	7	10.8	15	43.71	220.4	190.4	M12	66	70	0.932	27.17
IPE A 270•	30.7	267	135	5.5	8.7	15	39.15	249.6	219.6	M16	70	72	1.037	33.75
IPE 270	36.1	270	135	6.6	10.2	15	45.95	249.6	219.6	M16	72	72	1.041	28.86
IPE O 270 ⁺	42.3	274	136	7.5	12.2	15	53.84	249.6	219.6	M16	72	72	1.051	24.88
IPE A 300•	36.5	297	150	6.1	9.2	15	46.53	278.6	248.6	M16	72	86	1.156	31.65
IPE 300	42.2	300	150	7.1	10.7	15	53.81	278.6	248.6	M16	72	86	1.160	27.46
IPE O 300 ⁺	49.3	304	152	8	12.7	15	62.83	278.6	248.6	M16	74	88	1.174	23.81
IPE A 330•	43.0	327	160	6.5	10	18	54.74	307	271	M16	78	96	1.250	29.09
IPE 330	49.1	330	160	7.5	11.5	18	62.61	307	271	M16	78	96	1.254	25.52
IPE O 330 ⁺	57.0	334	162	8.5	13.5	18	72.62	307	271	M16	80	98	1.268	22.24



- Commande minimale: pour S 235 JR, cf. conditions techniques de livraison p. 109; pour toute autre qualité 40t ou suivant accord.

+ Commande minimale: 40t par profilé et qualité ou suivant accord.

- Minimum order: for the S 235 JR grade cf. technical delivery conditions p. 109; for any other grade 40t or upon agreement.

+ Minimum order: 40t per section and grade or upon agreement.

- Mindestbestellmenge: für S 235 JR gemäß technischen Lieferbedingungen S. 109; für jede andere Güte 40t oder nach Vereinbarung.

+ Mindestbestellmenge: 40t pro Profil und Güte oder nach Vereinbarung.

IPE

Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z				s _s l _t l _w x 10 ⁻³			pure bending y-y			pure compression			
														S235	S355	S460	S235	S355	S460	
G kg/m	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{pl,y} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{pl,z} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	l _t cm ⁴	l _w x 10 ⁻³ cm ⁶	S235	S355	S460	S235	S355	S460		
IPE A 100	6.9	141.2	28.81	32.98	4.01	4.44	13.12	4.77	7.54	1.22	21.20	0.77	0.28	1	1	-	1	1	-	
IPE 100	8.1	171.0	34.20	39.41	4.07	5.08	15.92	5.79	9.15	1.24	23.70	1.2	0.35	1	1	-	1	1	-	
IPE A 120	8.7	257.4	43.77	49.87	4.83	5.41	22.39	7.00	10.98	1.42	22.20	1.04	0.71	1	1	-	1	1	-	
IPE 120	10.4	317.8	52.96	60.73	4.90	6.31	27.67	8.65	13.58	1.45	25.20	1.74	0.89	1	1	-	1	1	-	
IPE A 140	10.5	434.9	63.30	71.60	5.70	6.21	36.42	9.98	15.52	1.65	23.20	1.36	1.58	1	1	-	1	2	-	
IPE 140	12.9	541.2	77.32	88.34	5.74	7.64	44.92	12.31	19.25	1.65	26.70	2.45	1.98	1	1	-	1	1	-	
IPE A 160	12.7	689.3	87.81	99.09	6.53	7.80	54.43	13.27	20.70	1.83	26.34	1.96	3.09	1	1	-	1	3	-	
IPE 160	15.8	869.3	108.7	123.9	6.58	9.66	68.31	16.66	26.10	1.84	30.34	3.6	3.96	1	1	-	1	1	-	
IPE A 180	15.4	1063	120.1	135.3	7.37	9.20	81.89	18.00	27.96	2.05	27.84	2.7	5.93	1	1	-	2	3	-	
IPE 180	18.8	1317	146.3	166.4	7.42	11.25	100.9	22.16	34.60	2.05	31.84	4.79	7.43	1	1	-	1	2	-	
IPE O 180	21.3	1505	165.4	189.1	7.45	12.70	117.3	25.50	39.91	2.08	34.54	6.76	8.74	1	1	-	1	1	-	
IPE A 200	18.4	1591	161.6	181.7	8.23	11.47	117.2	23.43	36.54	2.23	32.56	4.11	10.53	1	1	-	2	4	-	
IPE 200	22.4	1943	194.3	220.6	8.26	14.00	142.4	28.47	44.61	2.24	36.66	6.98	12.99	1	1	-	1	2	-	
IPE O 200	25.1	2211	218.9	249.4	8.32	15.45	168.9	33.11	51.89	2.30	39.26	9.45	15.57	1	1	-	1	1	-	
IPE A 220	22.2	2317	213.5	240.2	9.05	13.55	171.4	31.17	48.49	2.46	34.46	5.69	18.71	1	1	-	2	4	-	
IPE 220	26.2	2772	252.0	285.4	9.11	15.88	204.9	37.25	58.11	2.48	38.36	9.07	22.67	1	1	-	1	2	-	
IPE O 220	29.4	3134	282.3	321.1	9.16	17.66	239.8	42.83	66.91	2.53	41.06	12.27	26.79	1	1	-	1	2	-	
IPE A 240	26.2	3290	277.7	311.6	9.94	16.31	240.1	40.02	62.40	2.68	39.37	8.35	31.26	1	1	-	2	4	-	
IPE 240	30.7	3892	324.3	366.6	9.97	19.14	283.6	47.27	73.92	2.69	43.37	12.88	37.39	1	1	-	1	2	-	
IPE O 240	34.3	4369	361.1	410.3	10.00	21.36	328.5	53.86	84.40	2.74	46.17	17.18	43.68	1	1	-	1	2	-	
IPE A 270	30.7	4917	368.3	412.5	11.21	18.75	358.0	53.03	82.34	3.02	40.47	10.30	59.51	1	1	-	3	4	-	
IPE 270	36.1	5790	428.9	484.0	11.23	22.14	419.9	62.20	96.95	3.02	44.57	15.94	70.58	1	1	-	2	3	-	
IPE O 270	42.3	6947	507.1	574.6	11.36	25.23	513.5	75.51	117.7	3.09	49.47	24.90	87.64	1	1	-	1	2	-	
IPE A 300	36.5	7173	483.1	541.8	12.42	22.25	519.0	69.20	107.3	3.34	42.07	13.43	107.2	1	2	-	3	4	-	
IPE 300	42.2	8356	557.1	628.4	12.46	25.68	603.8	80.50	125.2	3.35	46.07	20.12	125.9	1	1	-	2	4	-	
IPE O 300	49.3	9994	657.5	743.8	12.61	29.05	745.7	98.12	152.6	3.45	50.97	31.06	157.7	1	1	-	1	3	-	
IPE A 330	43.0	10230	625.7	701.9	13.67	26.99	685.2	85.64	133.3	3.54	47.59	19.57	171.5	1	1	-	3	4	-	
IPE 330	49.1	11770	713.1	804.3	13.71	30.81	788.1	98.52	153.7	3.55	51.59	28.15	199.1	1	1	-	2	4	-	
IPE O 330	57.0	13910	833.0	942.8	13.84	34.88	960.4	118.6	185.0	3.64	56.59	42.15	245.7	1	1	-	1	3	-	

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Poutrelles I européennes

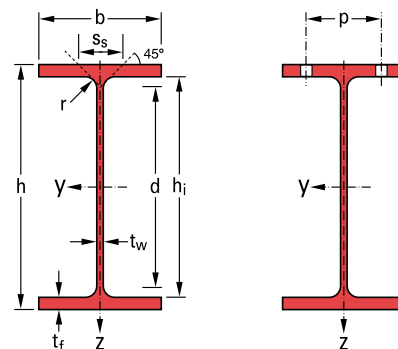
IPE 100 - 600 conformes à l'Euronorme 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750

European I beams

IPE 100 - 600 in accordance with Euronorm 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750

Europäische I-Profile

IPE 100 - 600 gemäß Euronorm 19-57; IPE A 100 - 600; IPE O 180 - 600; IPE 750



Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A cm ²	h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
IPE A 360•	50.2	357.6	170	6.6	11.5	18	63.96	334.6	298.6	M22	86	88	1.351	26.91
IPE 360	57.1	360	170	8	12.7	18	72.73	334.6	298.6	M22	88	88	1.353	23.70
IPE O 360 ⁺	66.0	364	172	9.2	14.7	18	84.13	334.6	298.6	M22	90	90	1.367	20.69
IPE A 400•	57.4	397	180	7	12	21	73.10	373	331	M22	94	98	1.464	25.51
IPE 400	66.3	400	180	8.6	13.5	21	84.46	373	331	M22	96	98	1.467	22.12
IPE O 400 ⁺	75.7	404	182	9.7	15.5	21	96.39	373	331	M22	96	100	1.481	19.57
IPE A 450•	67.2	447	190	7.6	13.1	21	85.55	420.8	378.8	M24	100	102	1.603	23.87
IPE 450	77.6	450	190	9.4	14.6	21	98.82	420.8	378.8	M24	100	102	1.605	20.69
IPE O 450 ⁺	92.4	456	192	11	17.6	21	117.7	420.8	378.8	M24	102	104	1.622	17.56
IPE A 500•	79.4	497	200	8.4	14.5	21	101.1	468	426	M24	100	112	1.741	21.94
IPE 500	90.7	500	200	10.2	16	21	115.5	468	426	M24	102	112	1.744	19.23
IPE O 500 ⁺	107	506	202	12	19	21	136.7	468	426	M24	104	114	1.760	16.40
IPE A 550•	92.1	547	210	9	15.7	24	117.3	515.6	467.6	M24	106	122	1.875	20.36
IPE 550	106	550	210	11.1	17.2	24	134.4	515.6	467.6	M24	110	122	1.877	17.78
IPE O 550 ⁺	123	556	212	12.7	20.2	24	156.1	515.6	467.6	M24	110	122	1.893	15.45
IPE A 600•	108	597	220	9.8	17.5	24	137.0	562	514	M27	114	118	2.013	18.72
IPE 600	122	600	220	12	19	24	156.0	562	514	M27	116	118	2.015	16.45
IPE O 600 ⁺	154	610	224	15	24	24	196.8	562	514	M27	118	122	2.045	13.24
IPE 750 x 147	147	753	265	13.2	17	17	187.5	719	685	M27	104	164	2.510	17.06
IPE 750 x 173 ⁺	173	762	267	14.4	21.6	17	221.3	718.8	684.8	M27	104	166	2.534	14.58
IPE 750 x 196 ⁺	196	770	268	15.6	25.4	17	250.8	719.2	685.2	M27	106	166	2.552	12.96



• Commande minimale: pour S 235 JR, cf. conditions techniques de livraison p. 109; pour toute autre qualité 40t ou suivant accord.

+ Commande minimale: 40t par profilé et qualité ou suivant accord.

• Minimum order: for the S 235 JR grade cf. technical delivery conditions p. 109; for any other grade 40t or upon agreement.

+ Minimum order: 40t per section and grade or upon agreement.

• Mindestbestellmenge: für S 235 JR gemäß technischen Lieferbedingungen S. 109; für jede andere Güte 40t oder nach Vereinbarung.

+ Mindestbestellmenge: 40t pro Profil und Güte oder nach Vereinbarung.

IPE

Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z							pure bending y-y			pure compression			
														\$235	\$355	\$460	\$235	\$355	\$460	
G kg/m		I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	I _t cm ⁴	I _w x 10 ⁻³ cm ⁶	\$235	\$355	\$460	\$235	\$355	\$460	
IPE A 360	50.2	14520	811.8	906.8	15.06	29.76	944.3	111.1	171.9	3.84	50.69	26.51	282	1	1	-	4	4	-	
IPE 360	57.1	16270	903.6	1019	14.95	35.14	1043	122.8	191.1	3.79	54.49	37.32	313.6	1	1	-	2	4	-	
IPE O 360	66.0	19050	1047	1186	15.05	40.21	1251	145.5	226.9	3.86	59.69	55.76	380.3	1	1	-	1	3	-	
IPE A 400	57.4	20290	1022	1144	16.66	35.78	1171	130.1	202.1	4.00	55.60	34.79	432.2	1	1	-	4	4	-	
IPE 400	66.3	23130	1156	1307	16.55	42.69	1318	146.4	229.0	3.95	60.20	51.08	490	1	1	-	3	4	-	
IPE O 400	75.7	26750	1324	1502	16.66	47.98	1564	171.9	269.1	4.03	65.30	73.10	587.6	1	1	-	2	3	-	
IPE A 450	67.2	29760	1331	1494	18.65	42.26	1502	158.1	245.7	4.19	58.40	45.67	704.9	1	1	-	4	4	-	
IPE 450	77.6	33740	1500	1702	18.48	50.85	1676	176.4	276.4	4.12	63.20	66.87	791	1	1	-	3	4	-	
IPE O 450	92.4	40920	1795	2046	18.65	59.4	2085	217.2	341.0	4.21	70.80	109	997.6	1	1	-	2	4	-	
IPE A 500	79.4	42930	1728	1946	20.61	50.41	1939	193.9	301.6	4.38	62.00	62.78	1125	1	1	-	4	4	-	
IPE 500	90.7	48200	1928	2194	20.43	59.87	2142	214.2	335.9	4.31	66.80	89.29	1249	1	1	1	3	4	4	
IPE O 500	107	57780	2284	2613	20.56	70.21	2622	259.6	408.5	4.38	74.60	143.5	1548	1	1	1	2	4	4	
IPE A 550	92.1	59980	2193	2475	22.61	60.30	2432	231.6	361.5	4.55	68.52	86.53	1710	1	1	-	4	4	-	
IPE 550	106	67120	2441	2787	22.35	72.34	2668	254.1	400.5	4.45	73.62	123.2	1884	1	1	1	4	4	4	
IPE O 550	123	79160	2847	3263	22.52	82.69	3224	304.2	480.5	4.55	81.22	187.5	2302	1	1	1	2	4	4	
IPE A 600	108	82920	2778	3141	24.6	70.14	3116	283.3	442.1	4.77	72.92	118.8	2607	1	1	-	4	4	-	
IPE 600	122	92080	3069	3512	24.3	83.78	3387	307.9	485.6	4.66	78.12	165.4	2846	1	1	1	4	4	4	
IPE O 600	154	118300	3879	4471	24.52	104.4	4521	403.6	640.1	4.79	91.12	318.1	3860	1	1	1	2	4	4	
IPE 750 x 147	147	166100	4411	5110	29.76	105.4	5289	399.2	630.8	5.31	67.12	161.5	7141	1	1	-	4	4	-	
IPE 750 x 173	173	205800	5402	6218	30.49	116.4	6873	514.9	809.9	5.57	77.52	273.6	9391	1	1	1	4	4	4	
IPE 750 x 196	196	240300	6241	7174	30.95	127.3	8175	610.1	958.8	5.71	86.32	408.9	11290	1	1	1	4	4	4	

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z							pure bending y-y			pure compression			
														S235	S355	S460	S235	S355	S460	
G kg/m	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	I _t cm ⁴	I _w x 10 ⁻³ cm ⁶	S235	S355	S460	S235	S355	S460		
HE 100 AA	12.2	236.5	51.98	58.36	3.89	6.15	92.06	18.41	28.44	2.43	29.26	2.51	1.68	1	3	-	1	3	-	
HE 100 A	16.7	349.2	72.76	83.01	4.06	7.56	133.8	26.76	41.14	2.51	35.06	5.24	2.58	1	1	-	1	1	-	
HE 100 B	20.4	449.5	89.91	104.2	4.16	9.04	167.3	33.45	51.42	2.53	40.06	9.25	3.38	1	1	-	1	1	-	
HE 100 M	41.8	1143	190.4	235.8	4.63	18.04	399.2	75.31	116.3	2.74	66.06	68.21	9.93	1	1	-	1	1	-	
HE 120 AA	14.6	413.4	75.85	84.12	4.72	6.90	158.8	26.47	40.62	2.93	29.26	2.78	4.24	2	3	-	2	3	-	
HE 120 A	19.9	606.2	106.3	119.5	4.89	8.46	230.9	38.48	58.85	3.02	35.06	5.99	6.47	1	1	-	1	1	-	
HE 120 B	26.7	864.4	144.1	165.2	5.04	10.96	317.5	52.92	80.97	3.06	42.56	13.84	9.41	1	1	-	1	1	-	
HE 120 M	52.1	2018	288.2	350.6	5.51	21.15	702.8	111.6	171.6	3.25	68.56	91.66	24.79	1	1	-	1	1	-	
HE 140 AA	18.1	719.5	112.4	123.8	5.59	7.92	274.8	39.26	59.93	3.45	30.36	3.54	10.21	3	3	-	3	3	-	
HE 140 A	24.7	1033	155.4	173.5	5.73	10.12	389.3	55.62	84.85	3.52	36.56	8.13	15.06	1	2	-	1	2	-	
HE 140 B	33.7	1509	215.6	245.4	5.93	13.08	549.7	78.52	119.8	3.58	45.06	20.06	22.48	1	1	-	1	1	-	
HE 140 M	63.2	3291	411.4	493.8	6.39	24.46	1144	156.8	240.5	3.77	71.06	120	54.33	1	1	-	1	1	-	
HE 160 AA	23.8	1283	173.4	190.4	6.50	10.38	478.7	59.84	91.36	3.97	36.07	6.33	23.75	3	3	-	3	3	-	
HE 160 A	30.4	1673	220.1	245.1	6.57	13.21	615.6	76.95	117.6	3.98	41.57	12.19	31.41	1	2	-	1	2	-	
HE 160 B	42.6	2492	311.5	354.0	6.78	17.59	889.2	111.2	170.0	4.05	51.57	31.24	47.94	1	1	-	1	1	-	
HE 160 M	76.2	5098	566.5	674.6	7.25	30.81	1759	211.9	325.5	4.26	77.57	162.4	108.1	1	1	-	1	1	-	
HE 180 AA	28.7	1967	235.6	258.2	7.34	12.16	730.0	81.11	123.6	4.47	37.57	8.33	46.36	3	3	-	3	3	-	
HE 180 A	35.5	2510	293.6	324.9	7.45	14.47	924.6	102.7	156.5	4.52	42.57	14.80	60.21	1	3	-	1	3	-	
HE 180 B	51.2	3831	425.7	481.4	7.66	20.24	1363	151.4	231.0	4.57	54.07	42.16	93.75	1	1	-	1	1	-	
HE 180 M	88.9	7483	748.3	883.4	8.13	34.65	2580	277.4	425.2	4.77	80.07	203.3	199.3	1	1	-	1	1	-	
HE 200 AA	34.6	2944	316.6	347.1	8.17	15.45	1068	106.8	163.2	4.92	42.59	12.69	84.49	3	4	-	3	4	-	
HE 200 A	42.3	3692	388.6	429.5	8.28	18.08	1336	133.6	203.8	4.98	47.59	20.98	108	1	3	-	1	3	-	
HE 200 B	61.3	5696	569.6	642.5	8.54	24.83	2003	200.3	305.8	5.07	60.09	59.28	171.1	1	1	-	1	1	-	
HE 200 M	103	10640	967.4	1135	9.00	41.03	3651	354.5	543.2	5.27	86.09	259.4	346.3	1	1	-	1	1	-	
HE 220 AA	40.4	4170	406.9	445.5	9.00	17.63	1510	137.3	209.3	5.42	44.09	15.93	145.6	3	4	-	3	4	-	
HE 220 A	50.5	5410	515.2	568.5	9.17	20.67	1955	177.7	270.6	5.51	50.09	28.46	193.3	1	3	-	1	3	-	
HE 220 B	71.5	8091	735.5	827.0	9.43	27.92	2843	258.5	393.9	5.59	62.59	76.57	295.4	1	1	-	1	1	-	
HE 220 M	117	14600	1217	1419	9.89	45.31	5012	443.5	678.6	5.79	88.59	315.3	572.7	1	1	-	1	1	-	
HE 240 AA	47.4	5835	521.0	570.6	9.83	21.54	2077	173.1	264.4	5.87	49.10	22.98	239.6	3	4	-	3	4	-	
HE 240 A	60.3	7763	675.1	744.6	10.05	25.18	2769	230.7	351.7	6.00	56.10	41.55	328.5	1	3	-	1	3	-	
HE 240 B	83.2	11260	938.3	1053	10.31	33.23	3923	326.9	498.4	6.08	68.60	102.7	486.9	1	1	-	1	1	-	
HE 240 M	157	24290	1799	2117	11.03	60.07	8153	657.5	1006	6.39	106.6	627.9	1152	1	1	-	1	1	-	
HE 260 AA	54.1	7981	654.1	714.5	10.76	24.75	2788	214.5	327.7	6.36	53.62	30.31	382.6	3	4	-	3	4	-	
HE 260 A	68.2	10450	836.4	919.8	10.97	28.76	3668	282.1	430.2	6.50	60.62	52.37	516.4	2	3	3	2	3	3	
HE 260 B	93.0	14920	1148	1283	11.22	37.59	5135	395.0	602.2	6.58	73.12	123.8	753.7	1	1	2	1	1	2	
HE 260 M	172	31310	2159	2524	11.94	66.89	10450	779.7	1192	6.90	111.1	719	1728	1	1	1	1	1	1	

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Poutrelles européennes à larges ailes

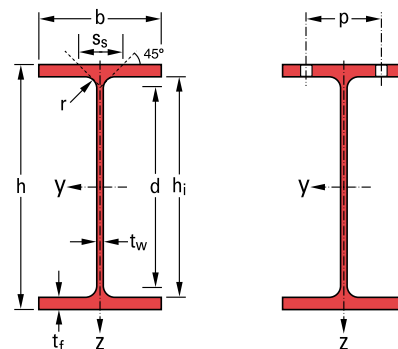
HE A, HE B et HE M 100 - 1000 conformes à l'Euronorme 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

European wide flange beams

HE A, HE B and HE M 100 - 1000 in accordance with Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

Europäische Breitflanschträger

HE A, HE B und HE M 100 - 1000 gemäß Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100



Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A cm ²	h ₁ mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
HE 280 AA ⁺	61.2	264	280	7	10	24	78.02	244	196	M27	110	178	1.593	26.01
HE 280 A	76.4	270	280	8	13	24	97.26	244	196	M27	112	178	1.603	20.99
HE 280 B	103	280	280	10.5	18	24	131.4	244	196	M27	114	178	1.618	15.69
HE 280 M	189	310	288	18.5	33	24	240.2	244	196	M27	122	186	1.694	8.984
HE 300 AA ⁺	69.8	283	300	7.5	10.5	27	88.91	262	208	M27	116	198	1.705	24.42
HE 300 A	88.3	290	300	8.5	14	27	112.5	262	208	M27	118	198	1.717	19.43
HE 300 B	117	300	300	11	19	27	149.1	262	208	M27	120	198	1.732	14.80
HE 300 M	238	340	310	21	39	27	303.1	262	208	M27	132	208	1.832	7.699
HE 320 AA ⁺	74.2	301	300	8	11	27	94.58	279	225	M27	118	198	1.740	23.43
HE 320 A	97.6	310	300	9	15.5	27	124.4	279	225	M27	118	198	1.756	17.98
HE 320 B	127	320	300	11.5	20.5	27	161.3	279	225	M27	122	198	1.771	13.98
HE 320 M	245	359	309	21	40	27	312.0	279	225	M27	132	204	1.866	7.616
HE 340 AA ⁺	78.9	320	300	8.5	11.5	27	100.5	297	243	M27	118	198	1.777	22.52
HE 340 A	105	330	300	9.5	16.5	27	133.5	297	243	M27	118	198	1.795	17.13
HE 340 B	134	340	300	12	21.5	27	170.9	297	243	M27	122	198	1.810	13.49
HE 340 M	248	377	309	21	40	27	315.8	297	243	M27	132	204	1.902	7.670
HE 360 AA ⁺	83.7	339	300	9	12	27	106.6	315	261	M27	118	198	1.814	21.67
HE 360 A	112	350	300	10	17.5	27	142.8	315	261	M27	120	198	1.834	16.36
HE 360 B	142	360	300	12.5	22.5	27	180.6	315	261	M27	122	198	1.849	13.04
HE 360 M	250	395	308	21	40	27	318.8	315	261	M27	132	204	1.934	7.73
HE 400 AA ⁺	92.4	378	300	9.5	13	27	117.7	352	298	M27	118	198	1.891	20.46
HE 400 A	125	390	300	11	19	27	159.0	352	298	M27	120	198	1.912	15.32
HE 400 B	155	400	300	13.5	24	27	197.8	352	298	M27	124	198	1.927	12.41
HE 400 M	256	432	307	21	40	27	325.8	352	298	M27	132	202	2.004	7.835
HE 450 AA ⁺	99.7	425	300	10	13.5	27	127.1	398	344	M27	120	198	1.984	19.89
HE 450 A	140	440	300	11.5	21	27	178.0	398	344	M27	122	198	2.011	14.39
HE 450 B	171	450	300	14	26	27	218.0	398	344	M27	124	198	2.026	11.84
HE 450 M	263	478	307	21	40	27	335.4	398	344	M27	132	202	2.096	7.959
HE 500 AA ⁺	107	472	300	10.5	14	27	136.9	444	390	M27	120	198	2.077	19.33
HE 500 A	155	490	300	12	23	27	197.5	444	390	M27	122	198	2.110	13.60
HE 500 B	187	500	300	14.5	28	27	238.6	444	390	M27	124	198	2.125	11.34
HE 500 M	270	524	306	21	40	27	344.3	444	390	M27	132	202	2.184	8.079
HE 550 AA ⁺	120	522	300	11.5	15	27	152.8	492	438	M27	122	198	2.175	18.13
HE 550 A	166	540	300	12.5	24	27	211.8	492	438	M27	122	198	2.209	13.29
HE 550 B	199	550	300	15	29	27	254.1	492	438	M27	124	198	2.224	11.15
HE 550 M	278	572	306	21	40	27	354.4	492	438	M27	132	202	2.280	8.195



+ Commande minimale: 40t par profilé et qualité ou suivant accord.

+ Minimum order: 40t per section and grade or upon agreement.

+ Mindestbestellmenge: 40t pro Profil und Güte oder nach Vereinbarung.

Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z				s _s I _t I _w x 10 ⁻³			pure bending y-y			pure compression			
														S235	S355	S460	S235	S355	S460	
G kg/m	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{Vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{ply} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	I _t cm ⁴	I _w x 10 ⁻³ cm ⁶	S235	S355	S460	S235	S355	S460		
HE 280 AA 61.2	10560	799.8	873.1	11.63	27.52	3664	261.7	399.4	6.85	55.12	36.22	590.1	3	4	-	3	4	-		
HE 280 A 76.4	13670	1013	1112	11.86	31.74	4763	340.2	518.1	7.00	62.12	62.10	785.4	2	3	4	2	3	4		
HE 280 B 103	19270	1376	1534	12.11	41.09	6595	471.0	717.6	7.09	74.62	143.7	1130	1	1	2	1	1	2		
HE 280 M 189	39550	2551	2966	12.83	72.03	13160	914.1	1397	7.40	112.6	807.3	2520	1	1	1	1	1	1		
HE 300 AA 69.8	13800	975.6	1065	12.46	32.37	4734	315.6	482.3	7.30	60.13	49.35	877.2	3	4	-	3	4	-		
HE 300 A 88.3	18260	1260	1383	12.74	37.28	6310	420.6	641.2	7.49	68.13	85.17	1200	2	3	3	2	3	3		
HE 300 B 117	25170	1678	1869	12.99	47.43	8563	570.9	870.1	7.58	80.63	185	1688	1	1	3	1	1	3		
HE 300 M 238	59200	3482	4078	13.98	90.53	19400	1252	1913	8.00	130.6	1408	4386	1	1	1	1	1	1		
HE 320 AA 74.2	16450	1093	1196	13.19	35.40	4959	330.6	505.7	7.24	61.63	55.87	1041	3	4	-	3	4	-		
HE 320 A 97.6	22930	1479	1628	13.58	41.13	6985	465.7	709.7	7.49	71.63	108	1512	1	3	3	1	3	3		
HE 320 B 127	30820	1926	2149	13.82	51.77	9239	615.9	939.1	7.57	84.13	225.1	2069	1	1	2	1	1	2		
HE 320 M 245	68130	3796	4435	14.78	94.85	19710	1276	1951	7.95	132.6	1501	5004	1	1	1	1	1	1		
HE 340 AA 78.9	19550	1222	1341	13.95	38.69	5185	345.6	529.3	7.18	63.13	63.07	1231	3	4	-	3	4	-		
HE 340 A 105	27690	1678	1850	14.40	44.95	7436	495.7	755.9	7.46	74.13	127.2	1824	1	3	3	1	3	3		
HE 340 B 134	36660	2156	2408	14.65	56.09	9690	646.0	985.7	7.53	86.63	257.2	2454	1	1	1	1	1	1		
HE 340 M 248	76370	4052	4718	15.55	98.63	19710	1276	1953	7.90	132.6	1506	5584	1	1	1	1	1	1		
HE 360 AA 83.7	23040	1359	1495	14.70	42.17	5410	360.7	553.0	7.12	64.63	70.99	1444	3	4	-	3	4	-		
HE 360 A 112	33090	1891	2088	15.22	48.96	7887	525.8	802.3	7.43	76.63	148.8	2177	1	2	3	1	2	3		
HE 360 B 142	43190	2400	2683	15.46	60.60	10140	676.1	1032	7.49	89.13	292.5	2883	1	1	1	1	1	1		
HE 360 M 250	84870	4297	4989	16.32	102.4	19520	1268	1942	7.83	132.6	1507	6137	1	1	1	1	1	1		
HE 400 AA 92.4	31250	1654	1824	16.30	47.95	5861	390.8	599.7	7.06	67.13	84.69	1948	3	3	-	3	3	-		
HE 400 A 125	45070	2311	2562	16.84	57.33	8564	570.9	872.9	7.34	80.63	189	2942	1	1	3	1	2	3		
HE 400 B 155	57680	2884	3232	17.08	69.98	10820	721.3	1104	7.40	93.13	355.7	3817	1	1	1	1	1	1		
HE 400 M 256	104100	4820	5571	17.88	110.2	19340	1260	1934	7.70	132.6	1515	7410	1	1	1	1	1	1		
HE 450 AA 99.7	41890	1971	2183	18.16	54.70	6088	405.8	624.4	6.92	68.63	95.61	2572	3	3	-	3	4	-		
HE 450 A 140	63720	2896	3216	18.92	65.78	9465	631.0	965.5	7.29	85.13	243.8	4148	1	1	1	1	2	3		
HE 450 B 171	79890	3551	3982	19.14	79.66	11720	781.4	1198	7.33	97.63	440.5	5258	1	1	1	1	1	2		
HE 450 M 263	131500	5501	6331	19.80	119.8	19340	1260	1939	7.59	132.6	1529	9251	1	1	1	1	1	1		
HE 500 AA 107	54640	2315	2576	19.98	61.91	6314	420.9	649.3	6.79	70.13	107.7	3304	2	3	-	2	4	-		
HE 500 A 155	86970	3550	3949	20.98	74.72	10370	691.1	1059	7.24	89.63	309.3	5643	1	1	1	1	3	4		
HE 500 B 187	107200	4287	4815	21.19	89.82	12620	841.6	1292	7.27	102.1	538.4	7018	1	1	1	1	2	2		
HE 500 M 270	161900	6180	7094	21.69	129.5	19150	1252	1932	7.46	132.6	1539	11190	1	1	1	1	1	1		
HE 550 AA 120	72870	2792	3128	21.84	72.66	6767	451.1	698.6	6.65	73.13	133.7	4338	1	3	-	3	4	-		
HE 550 A 166	111900	4146	4622	22.99	83.72	10820	721.3	1107	7.15	92.13	351.5	7189	1	1	1	2	4	4		
HE 550 B 199	136700	4971	5591	23.20	100.1	13080	871.8	1341	7.17	104.6	600.3	8856	1	1	1	1	2	3		
HE 550 M 278	198000	6923	7933	23.64	139.6	19160	1252	1937	7.35	132.6	1554	13520	1	1	1	1	1	1		

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Poutrelles européennes à larges ailes

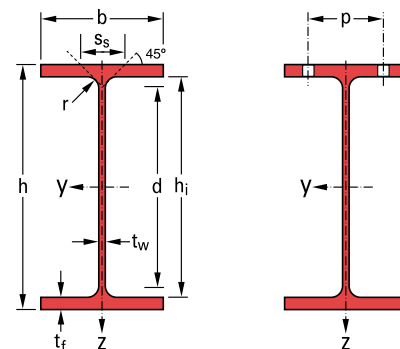
HE A, HE B et HE M 100 - 1000 conformes à l'Euronorme 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

European wide flange beams

HE A, HE B and HE M 100 - 1000 in accordance with Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

Europäische Breitflanschträger

HE A, HE B und HE M 100 - 1000 gemäß Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100



Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A cm ²	h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
HE 600 AA ⁺	129	571	300	12	15.5	27	164.1	540	486	M27	122	198	2.272	17.64
HE 600 A	178	590	300	13	25	27	226.5	540	486	M27	122	198	2.308	12.98
HE 600 B	212	600	300	15.5	30	27	270.0	540	486	M27	126	198	2.323	10.96
HE 600 M	285	620	305	21	40	27	363.7	540	486	M27	132	200	2.372	8.308
HE 600 x 337 ⁺	337	632	310	25.5	46	27	429.2	540	486	M27	138	202	2.407	7.144
HE 600 x 399 ⁺	399	648	315	30	54	27	508.5	540	486	M27	142	208	2.450	6.137
HE 650 AA ⁺	138	620	300	12.5	16	27	175.8	588	534	M27	122	198	2.369	17.17
HE 650 A	190	640	300	13.5	26	27	241.6	588	534	M27	124	198	2.407	12.69
HE 650 B	225	650	300	16	31	27	286.3	588	534	M27	126	198	2.422	10.77
HE 650 M	293	668	305	21	40	27	373.7	588	534	M27	132	200	2.468	8.411
HE 650 x 343 ⁺	343	680	309	25	46	27	437.5	588	534	M27	138	202	2.500	7.278
HE 650 x 407 ⁺	407	696	314	29.5	54	27	518.8	588	534	M27	142	206	2.543	6.243
HE 700 AA ⁺	150	670	300	13	17	27	190.9	636	582	M27	122	198	2.468	16.46
HE 700 A	204	690	300	14.5	27	27	260.5	636	582	M27	124	198	2.505	12.25
HE 700 B	241	700	300	17	32	27	306.4	636	582	M27	126	198	2.520	10.48
HE 700 M	301	716	304	21	40	27	383.0	636	582	M27	132	200	2.560	8.513
HE 700 x 352 ⁺	352	728	308	25	46	27	448.6	636	582	M27	138	200	2.592	7.359
HE 700 x 418 ⁺	418	744	313	29.5	54	27	531.9	636	582	M27	142	206	2.635	6.310
HE 800 AA ⁺	172	770	300	14	18	30	218.5	734	674	M27	130	198	2.660	15.51
HE 800 A	224	790	300	15	28	30	285.8	734	674	M27	130	198	2.698	12.03
HE 800 B	262	800	300	17.5	33	30	334.2	734	674	M27	134	198	2.713	10.34
HE 800 M	317	814	303	21	40	30	404.3	734	674	M27	138	198	2.746	8.655
HE 800 x 373 ⁺	373	826	308	25	46	30	474.6	734	674	M27	144	200	2.782	7.469
HE 800 x 444 ⁺	444	842	313	30	54	30	566.0	734	674	M27	148	206	2.824	6.357
HE 900 AA ⁺	198	870	300	15	20	30	252.2	830	770	M27	130	198	2.858	14.44
HE 900 A	252	890	300	16	30	30	320.5	830	770	M27	132	198	2.896	11.51
HE 900 B	291	900	300	18.5	35	30	371.3	830	770	M27	134	198	2.911	9.990
HE 900 M	333	910	302	21	40	30	423.6	830	770	M27	138	198	2.934	8.824
HE 900 x 391 ⁺	391	922	307	25	46	30	497.7	830	770	M27	144	200	2.970	7.604
HE 900 x 466 ⁺	466	938	312	30	54	30	593.7	830	770	M27	148	204	3.012	6.464



+ Commande minimale: 40t par profilé et qualité ou suivant accord.

+ Minimum order: 40t per section and grade or upon agreement.

+ Mindestbestellmenge: 40t pro Profil und Güte oder nach Vereinbarung.

Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z				pure bending y-y			pure compression						
G kg/m	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{pl,y} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{pl,z} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	I _t cm ⁴	I _w x 10 ⁻³ cm ⁶	S235	S355	S460	S235	S355	S460		
HE 600 AA	129	91900	3218	3623	23.66	81.29	6993	466.2	724.5	6.53	74.63	149.8	5381	1	3	-	3	4	-	
HE 600 A	178	141200	4787	5350	24.97	93.21	11270	751.4	1156	7.05	94.63	397.8	8978	1	1	1	2	4	4	HI
HE 600 B	212	171000	5701	6425	25.17	110.8	13530	902.0	1391	7.08	107.1	667.2	10970	1	1	1	1	3	4	HI
HE 600 M	285	237400	7660	8772	25.55	149.7	18980	1244	1930	7.22	132.6	1564	15910	1	1	1	1	1	1	HI
HE 600 x 337	337	283200	8961	10380	25.69	180.5	22940	1480	2310	7.31	149.1	2451	19610	1	1	1	1	1	1	HI
HE 600 x 399	399	344600	10640	12460	26.03	213.6	28280	1796	2814	7.46	169.6	3966	24810	1	1	1	1	1	1	HI
HE 650 AA	138	113900	3676	4160	25.46	90.40	7221	481.4	750.7	6.41	76.13	167.5	6567	1	3	-	4	4	-	
HE 650 A	190	175200	5474	6136	26.93	103.2	11720	781.6	1205	6.97	97.13	448.3	11030	1	1	1	3	4	4	HI
HE 650 B	225	210600	6480	7320	27.12	122.0	13980	932.3	1441	6.99	109.6	739.2	13360	1	1	1	2	3	4	HI
HE 650 M	293	281700	8433	9657	27.45	159.7	18980	1245	1936	7.13	132.6	1579	18650	1	1	1	1	1	2	HI
HE 650 x 343	343	333700	9815	11350	27.62	189.6	22720	1470	2300	7.21	148.6	2442	22730	1	1	1	1	1	1	HI
HE 650 x 407	407	405400	11650	13620	27.95	224.8	28020	1785	2803	7.35	169.1	3958	28710	1	1	1	1	1	1	HI
HE 700 AA	150	142700	4260	4840	27.34	100.3	7673	511.5	799.7	6.34	78.63	195.2	8155	1	2	-	4	4	-	
HE 700 A	204	215300	6241	7032	28.75	117.0	12180	811.9	1257	6.84	100.1	513.9	13350	1	1	1	3	4	4	HI
HE 700 B	241	256900	7340	8327	28.96	137.1	14440	962.7	1495	6.87	112.6	830.9	16060	1	1	1	2	4	4	HI
HE 700 M	301	329300	9198	10540	29.32	169.8	18800	1237	1929	7.01	132.6	1589	21400	1	1	1	1	2	3	HI
HE 700 x 352	352	389700	10710	12390	29.47	201.6	22510	1461	2293	7.08	148.6	2461	26050	1	1	1	1	1	1	HI
HE 700 x 418	418	472500	12700	14840	29.80	239.0	27760	1774	2797	7.22	169.1	3989	32850	1	1	1	1	1	1	HI
HE 800 AA	172	208900	5426	6225	30.92	123.8	8134	542.2	856.6	6.10	85.15	256.8	11450	1	2	-	4	4	-	
HE 800 A	224	303400	7682	8699	32.58	138.8	12640	842.6	1312	6.65	106.1	596.9	18290	1	1	1	4	4	4	HI
HE 800 B	262	359100	8977	10230	32.78	161.8	14900	993.6	1553	6.68	118.6	946	21840	1	1	1	3	4	4	HI
HE 800 M	317	442600	10870	12490	33.09	194.3	18630	1230	1930	6.79	136.1	1646	27780	1	1	1	1	3	4	HI
HE 800 x 373	373	523900	12690	14700	33.23	230.3	22530	1463	2311	6.89	152.1	2554	34070	1	1	1	1	2	2	HI
HE 800 x 444	444	634500	15070	17640	33.48	276.5	27800	1776	2827	7.01	173.1	4180	42840	1	1	1	1	1	1	HI
HE 900 AA	198	301100	6923	7999	34.55	147.2	9041	602.8	957.7	5.99	90.15	334.9	16260	1	1	-	4	4	-	
HE 900 A	252	422100	9485	10810	36.29	163.3	13550	903.2	1414	6.50	111.1	736.8	24960	1	1	1	4	4	4	HI
HE 900 B	291	494100	10980	12580	36.48	188.8	15820	1054	1658	6.53	123.6	1137	29460	1	1	1	3	4	4	HI
HE 900 M	333	570400	12540	14440	36.70	214.4	18450	1222	1929	6.60	136.1	1671	34750	1	1	1	2	4	4	HI
HE 900 x 391	391	674300	14630	16990	36.81	254.3	22320	1454	2312	6.70	152.1	2597	42560	1	1	1	1	3	4	HI
HE 900 x 466	466	814900	17380	20380	37.05	305.3	27560	1767	2832	6.81	173.1	4256	53400	1	1	1	1	1	2	HI

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Poutrelles européennes à larges ailes

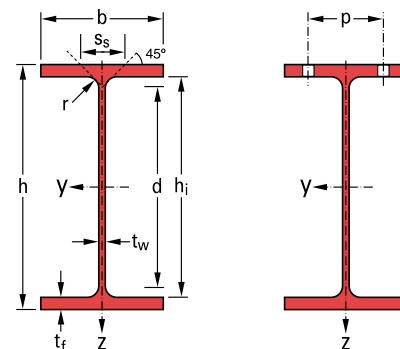
HE A, HE B et HE M 100 - 1000 conformes à l'Euronorme 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

European wide flange beams

HE A, HE B and HE M 100 - 1000 in accordance with Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100

Europäische Breitflanschträger

HE A, HE B und HE M 100 - 1000 gemäß Euronorm 53-62; HE AA 100 - 1000; HL 920 - 1100



Désignation Designation Bezeichnung		Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße					Surface Oberfläche	
G kg/m		h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A cm ²	h _i mm	d mm	Ø	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
HE 1000 AA ⁺	222	970	300	16	21	30	282.2	928	868	M27	132	198	3.056	13.80
HE 1000 A	272	990	300	16.5	31	30	346.8	928	868	M27	132	198	3.095	11.37
HE 1000 B	314	1000	300	19	36	30	400.0	928	868	M27	134	198	3.110	9.905
HE 1000 M	349	1008	302	21	40	30	444.2	928	868	M27	138	198	3.130	8.978
HE 1000 x 393 ⁺	393	1016	303	24.4	43.9	30	500.2	928	868	M27	144	196	3.144	8.006
HE 1000 x 409 ⁺	409	1020	306	25	46	30	521.2	928	868	M27	144	198	3.162	7.729
HE 1000 x 488 ⁺	488	1036	311	30	54	30	622.0	928	868	M27	148	204	3.204	6.563
HE 1000 x 579 ⁺	579	1056	316	35	64	30	737.0	928	868	M27	154	208	3.254	5.625
HL 920 x 342 ⁺	342	912	418	19.3	32.0	24	436.1	848	800	M27	126	312	3.42	9.98
HL 920 x 365 ⁺	365	916	419	20.3	34.3	24	464.4	847.4	799.4	M27	128	314	3.43	9.40
HL 920 x 387 ⁺	387	921	420	21.3	36.6	24	493.0	847.8	799.8	M27	128	314	3.44	8.88
HL 920 x 417 ⁺	417	928	422	22.5	39.9	24	532.5	848.2	800.2	M27	130	316	3.46	8.27
HL 920 x 446 ⁺	446	933	423	24.0	42.7	24	569.6	847.6	799.6	M27	130	318	3.47	7.76
HL 920 x 488 ⁺	488	942	422	25.9	47.0	24	621.3	848	800	M27	132	316	3.48	7.13
HL 920 x 534 ⁺	534	950	425	28.4	51.1	24	680.1	847.8	799.8	M27	136	320	3.50	6.56
HL 920 x 585 ⁺	585	960	427	31.0	55.9	24	745.3	848.2	800.2	M27	138	322	3.52	6.02
HL 920 x 653 ⁺	653	972	431	34.5	62.0	24	831.9	848	800	M27	144	320	3.56	5.45
HL 920 x 784 ⁺	784	996	437	40.9	73.9	24	997.7	848.2	800.2	M27	152	326	3.62	4.62
HL 920 x 967 ⁺	967	1028	446	50.0	89.9	24	1231	848.2	800.2	M27	160	334	3.70	3.83
HL 1000 x 296 ⁺	296	982	400	16.5	27	30	376.8	928	868	M27	134	294	3.479	11.76
HL 1000 A ⁺	321	990	400	16.5	31	30	408.8	928	868	M27	134	294	3.495	10.89
HL 1000 B ⁺	371	1000	400	19	36	30	472.0	928	868	M27	136	294	3.510	9.474
HL 1000 M ⁺	412	1008	402	21	40	30	524.2	928	868	M27	142	290	3.530	8.580
HL 1000 x 477 ⁺	477	1018	404	25.5	45	30	608.0	928	868	M27	146	292	3.549	7.437
HL 1000 x 554 ⁺	554	1032	408	29.5	52	30	705.8	928	868	M27	150	296	3.585	6.471
HL 1000 x 642 ⁺	642	1048	412	34	60	30	817.6	928	868	M27	154	300	3.624	5.647
HL 1000 x 748 ⁺	748	1068	417	39	70	30	953.4	928	868	M27	160	304	3.674	4.909
HL 1000 x 883 ⁺	883	1092	424	45.5	82	30	1125.3	928	868	M27	166	312	3.737	4.231
HL 1100 A ⁺	343	1090	400	18	31	20	436.5	1028	988	M27	116	294	3.710	10.83
HL 1100 B ⁺	390	1100	400	20	36	20	497.0	1028	988	M27	118	294	3.726	9.549
HL 1100 M ⁺	433	1108	402	22	40	20	551.2	1028	988	M27	122	290	3.746	8.657
HL 1100 R ⁺	499	1118	405	26	45	20	635.2	1028	988	M27	126	294	3.770	7.560



+ Commande minimale: 40t par profilé et qualité ou suivant accord.

+ Minimum order: 40t per section and grade or upon agreement.

+ Mindestbestellmenge: 40t pro Profil und Güte oder nach Vereinbarung.

HE/HL

Notations pages 104-108 / Bezeichnungen Seiten 104-108

Désignation Designation Bezeichnung		Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1						HISTAR
		axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z				s _s l _t I _w x 10 ⁻³			pure bending y-y			pure compression			
														S235	S355	S460	S235	S355	S460	
G kg/m	I _y cm ⁴	W _{el,y} cm ³	W _{pl,y} ⬆ cm ³	i _y cm	A _{vz} cm ²	I _z cm ⁴	W _{el,z} cm ³	W _{pl,z} ⬆ cm ³	i _z cm	s _s mm	l _t cm ⁴	I _w x 10 ⁻³ cm ⁶	S235	S355	S460	S235	S355	S460		
HE 1000 AA	222	406500	8380	9777	37.95	172.2	9501	633.4	1016	5.80	93.15	403.4	21280	1	1	-	4	4	-	
HE 1000 A	272	553800	11190	12820	39.96	184.6	14000	933.6	1470	6.35	113.6	822.4	32070	1	1	2	4	4	4	
HE 1000 B	314	644700	12890	14860	40.15	212.5	16280	1085	1716	6.38	126.1	1254	37640	1	1	1	4	4	4	
HE 1000 M	349	722300	14330	16570	40.32	235.0	18460	1222	1940	6.45	136.1	1701	43020	1	1	1	3	4	4	
HE 1000 x 393	393	807700	15900	18540	40.18	271.3	20500	1353	2168	6.40	147.3	2332	48080	1	1	1	2	4	4	
HE 1000 x 409	409	850800	16680	19450	40.40	278.8	22120	1446	2313	6.51	152.1	2642	52100	1	1	1	2	4	4	
HE 1000 x 488	488	1027000	19820	23300	40.62	334.7	27320	1757	2837	6.63	173.1	4334	65270	1	1	1	1	2	3	
HE 1000 x 579	579	1246000	23590	27950	41.11	393.3	34040	2154	3498	6.80	198.1	7102	82800	1	1	1	1	1	2	
HL 920 x 342	342	624900	13700	15450	37.85	190.1	39010	1867	2882	9.46	111.4	1193	75410	1	1	1	3	4	4	
HL 920 x 365	365	670500	14640	16520	38.00	200.4	42120	2011	3106	9.52	117.0	1446	81730	1	1	1	3	4	4	
HL 920 x 387	387	718300	15600	17630	38.17	210.9	45280	2156	3332	9.58	122.6	1734	88370	1	1	1	2	4	4	
HL 920 x 417	417	787600	16970	19210	38.46	223.9	50070	2373	3668	9.70	130.4	2200	98540	1	1	1	2	4	4	
HL 920 x 446	446	846800	18150	20600	38.56	239.1	53980	2552	3951	9.73	137.5	2685	106740	1	1	1	2	3	4	
HL 920 x 488	488	935390	19860	22615	38.80	259.3	59010	2797	4336	9.75	148.0	3514	117890	1	1	1	1	2	4	
HL 920 x 534	534	1031000	21710	24830	38.94	284.8	65560	3085	4796	9.82	158.7	4542	132070	1	1	1	1	2	3	
HL 920 x 585	585	1143090	23814	27363	39.16	312.0	72770	3408	5310	9.88	170.9	5932	148220	1	1	1	1	1	2	
HL 920 x 653	653	1292000	26590	30730	39.41	348.7	83050	3854	6022	9.99	186.6	8124	171280	1	1	1	1	1	1	
HL 920 x 784	784	1593000	31980	37340	39.95	417.6	103300	4728	7424	10.18	216.8	13730	218490	1	1	-	1	1	-	
HL 920 x 967	967	2033000	39540	46810	40.64	517.1	133900	6003	9486	10.43	257.9	24930	292450	1	1	-	1	1	-	
HL 1000 x 296	296	618700	12600	14220	40.52	181.5	28850	1443	2235	8.75	105.6	756.9	65670	1	1	2	4	4	4	
HL 1000 A	321	696400	14070	15800	41.27	184.6	33120	1656	2555	9.00	113.6	1021	76030	1	1	2	4	4	4	
HL 1000 B	371	812100	16240	18330	41.48	212.5	38480	1924	2976	9.03	126.1	1565	89210	1	1	1	4	4	4	
HL 1000 M	412	909800	18050	20440	41.66	235.0	43410	2160	3348	9.10	136.1	2128	101460	1	1	1	3	4	4	
HL 1000 x 477	477	1047000	20570	23530	41.50	282.8	49610	2456	3838	9.03	150.6	3159	117050	1	1	1	2	3	4	
HL 1000 x 554	554	1232000	23880	27500	41.79	328.0	59100	2897	4547	9.15	168.6	4860	141330	1	1	1	1	2	3	
HL 1000 x 642	642	1451000	27680	32100	42.12	379.6	70280	3412	5379	9.27	189.1	7440	170670	1	1	1	1	1	2	
HL 1000 x 748	748	1732000	32430	37880	42.62	438.9	85111	4082	6459	9.45	214.1	11670	210650	1	1	1	1	1	1	
HL 1000 x 883	883	2096000	38390	45260	43.16	516.5	105000	4952	7874	9.66	244.6	18750	265670	1	1	-	1	1	-	
HL 1100 A	343	867400	15920	18060	44.58	206.5	33120	1656	2568	8.71	103.4	1037	92710	1	1	2	4	4	4	
HL 1100 B	390	1005000	18280	20780	44.98	230.6	38480	1924	2988	8.80	115.4	1564	108680	1	1	1	4	4	4	
HL 1100 M	433	1126000	20320	23160	45.19	254.4	43410	2160	3362	8.87	125.4	2130	123500	1	1	1	4	4	4	
HL 1100 R	499	1294000	23150	26600	45.14	300.4	49980	2468	3870	8.87	139.4	3135	143410	1	1	1	2	4	4	

♦ W_{pl}: Pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise.
Voir page 108.

♦ W_{pl}: For plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity.
See page 108.

♦ W_{pl}: Bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören.
Siehe Seite 108.



Apêndice C

Catálogo de perfis tubulares Celsius 355

Celsius® SHS

- Formed at normalising temperature
- High sectional properties
- Fine grain structure
- Uniform mechanical properties
- Weldable in corner regions
- Higher compression capacity
- Negligible residual stress
- Tighter corner profile
- Suitability for galvanising
- Fire resistance capability
- Proven dynamic performance

Celsius hot finished structural hollow sections are produced in a standard grade, Celsius 355, which fully complies with EN 10210 S355J2H. A lower grade, Celsius 275, which fully complies with EN10210 S275J2H is also available. Both grades have a Charpy impact minimum average energy of 27J at -20°C.

All Celsius hot finished square and rectangular hollow sections have an improved corner profile of 2T maximum.

Technical data

Celsius® SHS Specification

Corus Tubes manufactures its Celsius SHS in accordance with the European Standard for hot finished structural hollow sections EN 10210, with the technical delivery requirements of EN 10210-1:1994 and the dimensions and tolerances to EN 10210-2:1997 plus an improved corner profile of 2T maximum. Celsius 275 and Celsius 355 are supplied in steel quality J2, making them suitable for all internal and external applications to BS5950-1:2000.

Celsius hot finished structural hollow sections are produced by Electric Weld (EW) process in sizes up to and including 508mm outside diameter, 400 x 400mm square and 500 x 300mm rectangular. Details of the regular and non regular production sizes, thickness and grades are shown on pages 4 and 5.

Celsius 355 Ovals are produced by the Electric Weld (EW) process in sizes from 150 x 75mm up to 500 x 250mm. Details of the sizes and thicknesses are shown on page 5.

A range of large Celsius CHS up to 2134 x 22.2 are available as listed in the Corus Tubes publication CT22 'Celsius LCHS'. A range of Jumbo hot finished hollow sections up to 800 x 800 x 60 SHS, 750 x 500 x 40 RHS and 711 x 40 CHS are also available as listed in the Corus Tubes publication CT27 'Jumbo structural hollow sections'.

Sizes, thicknesses and grades other than those shown in this publication may be available on request.

Chemical Composition and Mechanical Properties

Chemical composition - ladle analysis

	Celsius 275	Celsius 355
Specification	EN 10210 S275J2H	EN 10210 S355J2H
	% max	% max
Carbon	0.20*	0.22*
Silicon	–	0.55
Manganese	1.50	1.60
Sulphur	0.035	0.035
Phosphorus	0.035	0.035
Carbon equivalent (CEV) max T ≤ 16mm	0.41	0.45

* Up to and including 40mm thick

Mechanical properties

	Celsius 275	Celsius 355
Specification	EN 10210 S275J2H	EN 10210 S355J2H
Tensile Strength R_m N/mm ² : 3 ≤ T ≤ 65mm	410 - 560	490 - 630
Yield Strength R_{eH} min. N/mm ² : T ≤ 16mm	275	355
Min Elongation % T ≤ 40mm on gauge length 5.65. $\sqrt{S_0}$	22	22
Impact properties Minimum Ave energy (J) 10 x 10mm Specimen at -20°C	27	27

Inspection and Testing

Celsius hot finished structural hollow sections are submitted to specific inspection and testing, and supplied with an inspection certificate to EN 10204 type 3.1.B.

Designation

Celsius hot finished structural hollow sections are designated by their product brand name†, material grade, outside dimensions and thickness in millimetres.

Examples:

(a) circular hollow section:

Celsius 275 114.3 x 6.3

(b) rectangular hollow section:

Celsius 355 100 x 50 x 5.0

(c) oval hollow section:

Celsius 355 oval 400 x 200 x 8.0

Note †

Due to the fact that steel designations are the same across different product types it is essential, when specifying or ordering hot finished hollow sections that all references should include the Celsius brand name. Use of the grade reference (e.g. 355) alone may result in products with lower structural capacity being used. Alternatively products can be designated using the European product standard format, e.g. EN 10210 S355J2H 100 x 50 x 5.0

Dimensional tolerances

		Square/Rectangular	Circular/Ovals
Outside dimension (D B and H)		± 1% with a min of ± 0.5mm	± 1% with a min of ± 0.5mm and maximum of ±10mm
Thickness (T)	Welded	– 10%	– 10%
	Seamless	– 10% but > –10% < –12.5% may occur over not more than 25% of the circumference.	
		Note. Positive deviation limited by mass tolerance	Note. Positive deviation limited by mass tolerance
Squareness of side		90 degrees ± 1 degree	–
External corner profile		2T max at each corner	–
Concavity/convexity (x)		± 1% of the side, measured independently of the tolerance on the outside dimension	–
Twist (V)		2mm plus 0.5mm/m max. Section is placed on a flat surface with one end held flat. At the other end the height difference of the two lower corners is taken.	Ovals: 2mm plus 0.5mm/m max. –
Mass (M)	Welded	± 6% on individual lengths	± 6% on individual lengths
	Seamless	+ 8% – 6% on individual lengths	
Straightness		Maximum 0.2% of the total length.	Maximum 0.2% of the total length.
Length		+150mm /- 0	+150mm /- 0

Rectangular hollow sections – length ranges and tolerances

Size		Welded			Seamless
Squares mm	Rectangles mm	Standard mill lengths m	Special mill lengths m*	Tolerance mm	Standard random lengths m
40 x 40 uti 100 x 100	50 x 30 uti 120 x 80	6.0, 6.4, 7.5, 10.0 & 12.0	5.4 – 14.6	+150-0	–
120 x 120 uti 150 x 150 x 12.5	150 x 100 uti 200 x 100 x 12.5	6.0, 6.4, 7.5, 10.0 & 12.0	6.0 – 14.6	+150-0	–
150 x 150 x 16.0	200 x 100 x 16.0				10 – 11.2
160 x 160 to 400 x 400 x 16.0	200 x 120 to 450 x 250 x 16.0	10.0 & 12.0	6.0 – 15.35	+150-0	–
	500 x 300 uti 16.0	10.0 & 12.0	6.0 – 15.15	+150-0	–
400 x 400 x 20.0	500 x 300 x 20.0	8.5 – 9.2 randoms 12.0 – 12.7 subject to availability	–	–	–

*In 100mm increments also available

Circular hollow sections – length ranges and tolerances

Outside dia. mm	Welded Thickness mm	Standard mill lengths m	Special mill lengths m*	Tolerance mm
21.3 – 42.4	All	6.0, 6.4 & 7.5	5.4 – 7.5	+150-0
48.3	All	6.0, 6.4, 7.5 & 10.0	5.4 – 14.6	+150-0
60.3 – 114.3	All	6.0, 6.4, 7.5 & 10.0	5.0 – 14.6	+150-0
139.7	All	7.5 & 10.0	6.0 – 14.6	+150-0
168.3 – 193.7	All	7.5, 10.0 & 12.0	6.0 – 14.6	+150-0
219.1– 508.0	All	10.0 & 12.0	6.0 – 14.5	+150-0

*In 100mm increments also available

Oval hollow sections – length ranges and tolerances

Outside dia. mm	Welded Thickness mm	Standard mill lengths m*	Tolerance mm
150 x 75	All	7.5 & 10.0	+150-0
200 x 100	All	7.5, 10.0 & 12.0	+150-0
250 x 125	All	7.5, 10.0 & 12.0	+150-0
300 x 150	All	10.0 & 12.0	+150-0
400 x 200	All	10.0 & 12.0	+150-0
500 x 250	All	10.0 & 12.0	+150-0

*Special mill lengths in 100mm increments also available

Square and rectangular hollow sections

Celsius® 275

Size mm	Thickness mm									
	3.0	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0

Square/Rectangular

40 x 40										
50 x 50										
60 x 60										
80 x 80										
100 x 100										
120 x 80										
120 x 120										
150 x 100										
150 x 150										
160 x 80										
200 x 100										

Celsius® 355

Size mm	Thickness mm										
	3.0	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0	20.0

Square/Rectangular

40 x 40											
50 x 30	-										
50 x 50											
60 x 40											
60 x 60											
70 x 70	-	-									
80 x 40	-										
80 x 80	-	-									
90 x 50	-	-									
90 x 90											
100 x 50											
100 x 60	-	-									
100 x 100	-	-									
120 x 60											
120 x 80											
120 x 120											
140 x 140											
150 x 100											
150 x 150											
160 x 80											
160 x 160											
180 x 180											
200 x 100											
200 x 120											
200 x 150											
200 x 200											
250 x 100											
250 x 150											
250 x 250											
300 x 100											
300 x 200											
300 x 300											
350 x 350											
400 x 200											
400 x 400											
450 x 250											
500 x 300											

Circular hollow sections

Celsius® 275

Outside diameter mm	Thickness mm	2.9	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0
Circular											
76.1											
114.3											
139.7											

Celsius® 355

Outside diameter mm	Thickness mm	2.6	2.9	3.2	3.6	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0
Circular												
21.3		-	-	-								
26.9		-	-									
33.7			-		-							
42.4			-		-							
48.3			-		-							
60.3			-		-							
76.1					-							
88.9			-		-							
114.3					-							
139.7				-	-	-						
168.3											-	
193.7											-	
219.1											-	
244.5							-	-				
273.0							-					
323.9							-					
355.6								-	-	-	-	
406.4												
457.0												
508.0									-			

For sizes > 508.0 uti 2134mm diameter refer to Corus Tubes publication CT22 'Celsius® LCHS' or contact Corus Tubes Structural & Conveyance Business

Celsius® 355 Ovals

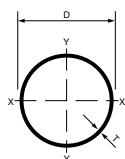
Outside diameter mm	Thickness mm	4.0	5.0	6.3	8.0	10.0	12.5	16.0
Circular								
150 x 75		-	-	-				
200 x 100				-	-	-	-	
250 x 125				-	-	-	-	
300 x 150					-	-	-	-
400 x 200								
500 x 250								

Regular production sections: Basis priced and manufactured on regular rolling cycles. Sections are produced ex mill in standard lengths/bundles, self-colour finish and in grades Celsius 275 or Celsius 355 as shown in the tables.

Non-Regular production sections: are rolled to order. Minimum quantities, extended lead times and price extras may apply.

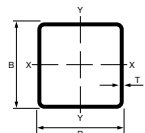
Other grades, sizes and thicknesses than those shown as regular/non regular and within the bold lines on the Celsius 355 tables may be available in Celsius 275 or Celsius 355 upon request and subject to increased minimum quantities.

Hot finished circular hollow sections



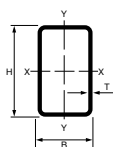
Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm ²	I cm ⁴	i cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _s m ² /m	m/t
76.1	2.9	5.24	6.67	44.7	2.59	11.8	15.5	89.5	23.5	0.239	191
	3.2	5.75	7.33	48.8	2.58	12.8	17.0	97.6	25.6	0.239	174
	4.0	7.11	9.06	59.1	2.55	15.5	20.8	118	31.0	0.239	141
114.3	3.6	9.83	12.5	192	3.92	33.6	44.1	384	67.2	0.359	102
	5.0	13.5	17.2	257	3.87	45.0	59.8	514	89.9	0.359	74.2
	6.3	16.8	21.4	313	3.82	54.7	73.6	625	109	0.359	59.6
139.7	5.0	16.6	21.2	481	4.77	68.8	90.8	961	138	0.439	60.2
	6.3	20.7	26.4	589	4.72	84.3	112	1177	169	0.439	48.2

Hot finished square hollow sections



Size	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
B x B mm	T mm	M kg/m	A cm ²	I cm ⁴	i cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _s m ² /m	m/t
40 x 40	4.0	4.39	5.59	11.8	1.45	5.91	7.44	19.5	8.54	0.150	228
50 x 50	4.0	5.64	7.19	25.0	1.86	9.99	12.3	40.4	14.5	0.190	177
	5.0	6.85	8.73	28.9	1.82	11.6	14.5	47.6	16.7	0.187	146
	6.3	8.31	10.6	32.8	1.76	13.1	17.0	55.2	18.8	0.184	120
60 x 60	5.0	8.42	10.7	53.3	2.23	17.8	21.9	86.4	25.7	0.227	119
80 x 80	6.3	14.2	18.1	162	2.99	40.5	49.7	262	58.7	0.304	70.2
100x100	4.0	11.9	15.2	232	3.91	46.4	54.4	361	68.2	0.390	83.9
	5.0	14.7	18.7	279	3.86	55.9	66.4	439	81.8	0.387	68.0
	6.3	18.2	23.2	336	3.80	67.1	80.9	534	97.8	0.384	54.9
	10.0	27.4	34.9	462	3.64	92.4	116	761	133	0.374	36.5
120x120	6.3	22.2	28.2	603	4.62	100	120	950	147	0.464	45.1
150x150	6.3	28.1	35.8	1223	5.85	163	192	1909	240	0.584	35.6
	10.0	43.1	54.9	1773	5.68	236	286	2832	344	0.574	23.2

Hot finished rectangular hollow sections



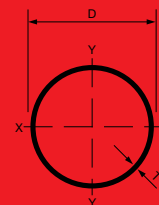
Size	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia		Radius of gyration		Elastic modulus		Plastic modulus		Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
H x B mm	T mm	M kg/m	A cm ²	I _{xx} cm ⁴	I _{yy} cm ⁴	i _{xx} cm	i _{yy} cm	W _{elxx} cm ³	W _{elyy} cm ³	W _{plxx} cm ³	W _{plyy} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _s m ² /m	m/t
120 x 80	6.3	18.2	23.2	440	230	4.36	3.15	73.3	57.6	91.0	68.2	487	92.9	0.384	54.9
	10.0	27.4	34.9	609	313	4.18	2.99	102	78.1	131	97.3	688	126	0.374	36.5
150 x 100	6.3	23.1	29.5	898	474	5.52	4.01	120	94.8	147	110	986	153	0.484	43.2
160 x 80	6.3	22.2	28.2	903	299	5.66	3.26	113	74.8	142	86.8	730	127	0.464	45.1
	10.0	33.7	42.9	1284	411	5.47	3.10	161	103	209	125	1041	175	0.454	29.7
200 x 100	8.0	35.1	44.8	2234	739	7.06	4.06	223	148	282	172	1804	251	0.579	28.5
	10.0	43.1	54.9	2664	869	6.96	3.98	266	174	341	206	2156	295	0.574	23.2
	12.5	52.7	67.1	3136	1004	6.84	3.87	314	201	408	245	2541	341	0.568	19.0

Non-regular or Other sizes production



Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm ²	I cm ⁴	i cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _s m ² /m	m/t
21.3	2.6	1.20	1.53	0.681	0.668	0.639	0.915	1.36	1.28	0.067	834
	2.9	1.32	1.68	0.727	0.659	0.683	0.990	1.45	1.37	0.067	760
	3.2	1.43	1.82	0.768	0.650	0.722	1.06	1.54	1.44	0.067	700
26.9	2.6	1.56	1.98	1.48	0.864	1.10	1.54	2.96	2.20	0.085	642
	2.9	1.72	2.19	1.60	0.855	1.19	1.68	3.19	2.38	0.085	583
	3.2	1.87	2.38	1.70	0.846	1.27	1.81	3.41	2.53	0.085	535
33.7	2.6	1.99	2.54	3.09	1.10	1.84	2.52	6.19	3.67	0.106	501
	2.9	2.20	2.81	3.36	1.09	1.99	2.76	6.71	3.98	0.106	454
	3.2	2.41	3.07	3.60	1.08	2.14	2.99	7.21	4.28	0.106	415
	3.6	2.67	3.40	3.91	1.07	2.32	3.28	7.82	4.64	0.106	374
	4.0	2.93	3.73	4.19	1.06	2.49	3.55	8.38	4.97	0.106	341
42.4	2.6	2.55	3.25	6.46	1.41	3.05	4.12	12.9	6.10	0.133	392
	2.9	2.82	3.60	7.06	1.40	3.33	4.53	14.1	6.66	0.133	354
	3.2	3.09	3.94	7.62	1.39	3.59	4.93	15.2	7.19	0.133	323
	3.6	3.44	4.39	8.33	1.38	3.93	5.44	16.7	7.86	0.133	290
	4.0	3.79	4.83	8.99	1.36	4.24	5.92	18.0	8.48	0.133	264
	5.0	4.61	5.87	10.5	1.33	4.93	7.04	20.9	9.86	0.133	217
48.3	2.9	3.25	4.14	10.7	1.61	4.43	5.99	21.4	8.86	0.152	308
	3.2	3.56	4.53	11.6	1.60	4.80	6.52	23.2	9.59	0.152	281
	3.6	3.97	5.06	12.7	1.59	5.26	7.21	25.4	10.5	0.152	252
	4.0	4.37	5.57	13.8	1.57	5.70	7.87	27.5	11.4	0.152	229
	5.0	5.34	6.80	16.2	1.54	6.69	9.42	32.3	13.4	0.152	187
60.3	2.9	4.11	5.23	21.6	2.03	7.16	9.56	43.2	14.3	0.189	244
	3.2	4.51	5.74	23.5	2.02	7.78	10.4	46.9	15.6	0.189	222
	3.6	5.03	6.41	25.9	2.01	8.58	11.6	51.7	17.2	0.189	199
	4.0	5.55	7.07	28.2	2.00	9.34	12.7	56.3	18.7	0.189	180
	5.0	6.82	8.69	33.5	1.96	11.1	15.3	67.0	22.2	0.189	147
76.1	2.9	5.24	6.67	44.7	2.59	11.8	15.5	89.5	23.5	0.239	191
	3.2	5.75	7.33	48.8	2.58	12.8	17.0	97.6	25.6	0.239	174
	3.6	6.44	8.20	54.0	2.57	14.2	18.9	108	28.4	0.239	155
	4.0	7.11	9.06	59.1	2.55	15.5	20.8	118	31.0	0.239	141
	5.0	8.77	11.2	70.9	2.52	18.6	25.3	142	37.3	0.239	114
	6.3	10.8	13.8	84.8	2.48	22.3	30.8	170	44.6	0.239	92.2
88.9	2.9	6.15	7.84	72.5	3.04	16.3	21.5	145	32.6	0.279	163
	3.2	6.76	8.62	79.2	3.03	17.8	23.5	158	35.6	0.279	148
	3.6	7.57	9.65	87.9	3.02	19.8	26.2	176	39.5	0.279	132
	4.0	8.38	10.7	96.3	3.00	21.7	28.9	193	43.3	0.279	119
	5.0	10.3	13.2	116	2.97	26.2	35.2	233	52.4	0.279	96.7
	6.3	12.8	16.3	140	2.93	31.5	43.1	280	63.1	0.279	77.9
114.3	3.2	8.77	11.2	172	3.93	30.2	39.5	345	60.4	0.359	114
	3.6	9.83	12.5	192	3.92	33.6	44.1	384	67.2	0.359	102
	4.0	10.9	13.9	211	3.90	36.9	48.7	422	73.9	0.359	91.9
	5.0	13.5	17.2	257	3.87	45.0	59.8	514	89.9	0.359	74.2
	6.3	16.8	21.4	313	3.82	54.7	73.6	625	109	0.359	59.6
139.7	3.2	10.8	13.7	320	4.83	45.8	59.6	640	91.6	0.439	92.8
	3.6	12.1	15.4	357	4.81	51.1	66.7	713	102	0.439	82.8
	4.0	13.4	17.1	393	4.80	56.2	73.7	786	112	0.439	74.7
	5.0	16.6	21.2	481	4.77	68.8	90.8	961	138	0.439	60.2
	6.3	20.7	26.4	589	4.72	84.3	112	1177	169	0.439	48.2
	8.0	26.0	33.1	720	4.66	103	139	1441	206	0.439	38.5
	10.0	32.0	40.7	862	4.60	123	169	1724	247	0.439	31.3
168.3	5.0	20.1	25.7	856	5.78	102	133	1712	203	0.529	49.7
	6.3	25.2	32.1	1053	5.73	125	165	2107	250	0.529	39.7
	8.0	31.6	40.3	1297	5.67	154	206	2595	308	0.529	31.6
	10.0	39.0	49.7	1564	5.61	186	251	3128	372	0.529	25.6
	12.5	48.0	61.2	1868	5.53	222	304	3737	444	0.529	20.8

Non-regular or Other sizes production




Outside diameter	Thickness	Mass	Sectional area	Moment of inertia	Radius of gyration	Elastic modulus	Plastic modulus	Torsional constants		Superficial area/m	Approx. length/tonne
D mm	T mm	M kg/m	A cm ²	I cm ⁴	i cm	W _{el} cm ³	W _{pl} cm ³	I _t cm ⁴	C _t cm ³	A _s m ² /m	m/t
193.7	5.0	23.3	29.6	1320	6.67	136	178	2640	273	0.609	43.0
	6.3	29.1	37.1	1630	6.63	168	221	3260	337	0.609	34.3
	8.0	36.6	46.7	2016	6.57	208	276	4031	416	0.609	27.3
	10.0	45.3	57.7	2442	6.50	252	338	4883	504	0.609	22.1
	12.5	55.9	71.2	2934	6.42	303	411	5869	606	0.609	17.9
219.1	5.0	26.4	33.6	1928	7.57	176	229	3856	352	0.688	37.9
	6.3	33.1	42.1	2386	7.53	218	285	4772	436	0.688	30.2
	8.0	41.6	53.1	2960	7.47	270	357	5919	540	0.688	24.0
	10.0	51.6	65.7	3598	7.40	328	438	7197	657	0.688	19.4
	12.5	63.7	81.1	4345	7.32	397	534	8689	793	0.688	15.7
	16.0	80.1	102	5297	7.20	483	661	10593	967	0.688	12.5
244.5	5.0	29.5	37.6	2699	8.47	221	287	5397	441	0.768	33.9
	6.3	37.0	47.1	3346	8.42	274	358	6692	547	0.768	27.0
	8.0	46.7	59.4	4160	8.37	340	448	8321	681	0.768	21.4
	10.0	57.8	73.7	5073	8.30	415	550	10146	830	0.768	17.3
	12.5	71.5	91.1	6147	8.21	503	673	12295	1006	0.768	14.0
	16.0	90.2	115	7533	8.10	616	837	15066	1232	0.768	11.1
273.0	5.0	33.0	42.1	3781	9.48	277	359	7562	554	0.858	30.3
	6.3	41.4	52.8	4696	9.43	344	448	9392	688	0.858	24.1
	8.0	52.3	66.6	5852	9.37	429	562	11703	857	0.858	19.1
	10.0	64.9	82.6	7154	9.31	524	692	14308	1048	0.858	15.4
	12.5	80.3	102	8697	9.22	637	849	17395	1274	0.858	12.5
	16.0	101	129	10707	9.10	784	1058	21414	1569	0.858	9.86
323.9	5.0	39.3	50.1	6369	11.3	393	509	12739	787	1.02	25.4
	6.3	49.3	62.9	7929	11.2	490	636	15858	979	1.02	20.3
	8.0	62.3	79.4	9910	11.2	612	799	19820	1224	1.02	16.0
	10.0	77.4	98.6	12158	11.1	751	986	24317	1501	1.02	12.9
	12.5	96.0	122	14847	11.0	917	1213	29693	1833	1.02	10.4
	16.0	121	155	18390	10.9	1136	1518	36780	2271	1.02	8.23
355.6	6.3	54.3	69.1	10547	12.4	593	769	21094	1186	1.12	18.4
	8.0	68.6	87.4	13201	12.3	742	967	26403	1485	1.12	14.6
	10.0	85.2	109	16223	12.2	912	1195	32447	1825	1.12	11.7
	12.5	106	135	19852	12.1	1117	1472	39704	2233	1.12	9.45
	16.0	134	171	24663	12.0	1387	1847	49326	2774	1.12	7.46
406.4	6.3	62.2	79.2	15849	14.1	780	1009	31699	1560	1.28	16.1
	8.0	78.6	100	19874	14.1	978	1270	39748	1956	1.28	12.7
	10.0	97.8	125	24476	14.0	1205	1572	48952	2409	1.28	10.2
	12.5	121	155	30031	13.9	1478	1940	60061	2956	1.28	8.24
	16.0	154	196	37449	13.8	1843	2440	74898	3686	1.28	6.49
457.0	6.3	70.0	89.2	22654	15.9	991	1280	45308	1983	1.44	14.3
	8.0	88.6	113	28446	15.9	1245	1613	56893	2490	1.44	11.3
	10.0	110	140	35091	15.8	1536	1998	70183	3071	1.44	9.07
	12.5	137	175	43145	15.7	1888	2470	86290	3776	1.44	7.30
	16.0	174	222	53959	15.6	2361	3113	107919	4723	1.44	5.75
508.0	6.3	77.9	99.3	31246	17.7	1230	1586	62493	2460	1.60	12.8
	8.0	98.6	126	39280	17.7	1546	2000	78560	3093	1.60	10.1
	10.0	123	156	48520	17.6	1910	2480	97040	3820	1.60	8.14
	12.5	153	195	59755	17.5	2353	3070	119511	4705	1.60	6.55
	16.0	194	247	74909	17.4	2949	3874	149818	5898	1.60	5.15

Non-regular or Other sizes production

Apêndice D

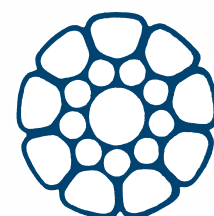
Catálogo de cabos de pré-esforço Bridon



Dyform stainless
steel cable
assemblies
for **glass walls**



BRIDON



Dyform Stainless Steel Strand (DYSS)

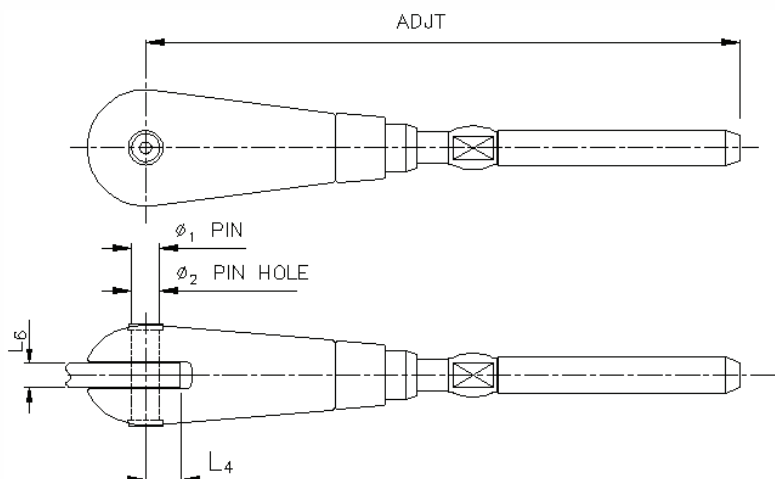
Product Code/ Strand Diameter	Minimum Breaking Load	Nominal Metallic Cross Section	Nominal Axial Stiffness	Nominal Metallic Mass
d	MBL	A	EA	Mass
mm	kN	mm ²	MN	kg/m
DYSS 8	60	44	6.5	0.35
DYSS 10	96	71	10.4	0.54
DYSS 12	141	103	15.5	0.81
DYSS 14	189	142	20	1.15
DYSS 16	251	189	28	1.47
DYSS 19	313	259	37	2.06
DYSS 22	421	338	48	2.76
DYSS 24	490	401	58	3.32
DYSS 26	568	465	66	3.79
DYSS 28	637	535	75	4.35
DYSS 32	833	709	100	5.89



The desire to maximise the transparency of glass wall structures has pushed engineers and designers towards using high strength steel cables as supporting and stiffening members. To meet the needs of this market, Bridon has developed a cable system incorporating the DYFORM® range of Stainless Steel Strand. DYFORM® Strand is manufactured by a special process using 316 grade stainless steel and provides significant advantages when used in glass wall applications. The unique features of DYFORM® Strand include lower stretch, higher strength, smaller diameter, larger surface area for clamping, no need for factory prestressing and a smoother surface finish. The use of DYFORM® Strand allows for optimisation of other components such as end terminations, clamps, butterflies and spreaders which can reduce the overall cost and the visual impact on the supporting structure.

Bridon can also assist with bespoke designs for all other components such as spiders, spreaders, rotules and butterflies.





Stylite Stainless Adjustable Fork Socket (SST-AF)

Product Code/ Strand Diameter	Characteristic Breaking Load	Design Load $G_{R,d}$ = CBL / 1.5 / 1.1	Maximum Adjustment	L_4	L_6	\varnothing_1	\varnothing_2
d	CBL	$F_{R,d}$	ADJT +/-			Pin	Pin Hole
mm	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm
SST-AF 8	54	33	22	24	12	15	16
SST-AF 10	86	52	22	30	15	19	20
SST-AF 12	127	77	25	35	18	22	23
SST-AF 14	170	103	28	41	20	25	27
SST-AF 16	226	137	28	45	25	28	30
SST-AF 19	282	171	30	50	25	30	32
SST-AF 22	379	230	30	56	25	33	35
SST-AF 24	441	267	32	60	30	36	38
SST-AF 26	511	310	32	66	30	40	42
SST-AF 28	573	347	32	72	35	45	47
SST-AF 32	750	455	35	82	40	52	54

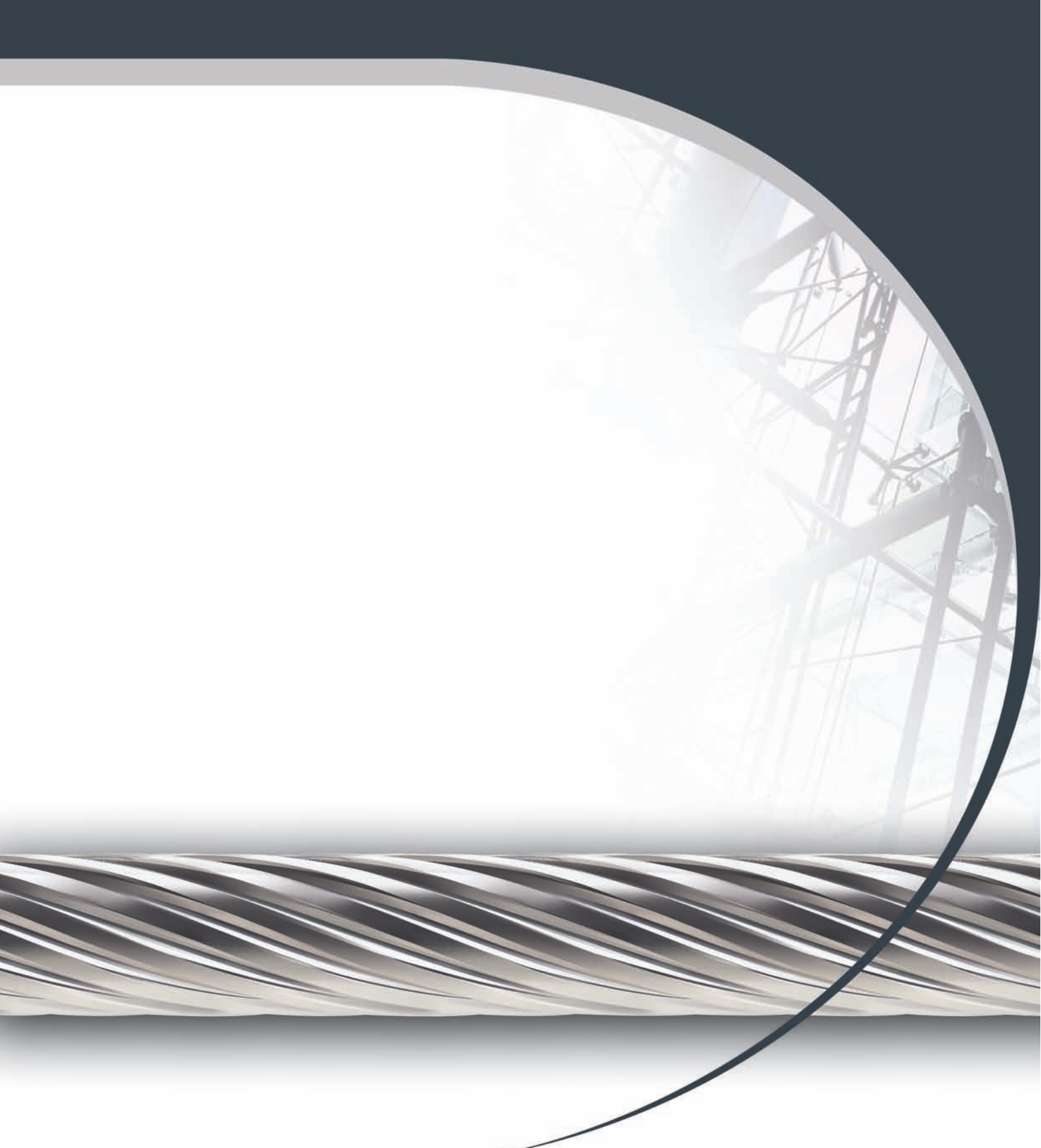
L_4 Minimum dimension for connecting steel work (assuming S355 material)

L_6 Recommended thickness of connecting steelwork (assuming S355 material)

The cable is attached to the structure using STYLITE® architectural end terminations. The STYLITE® socket is designed to match the performance of the DYFORM® strand and also takes into account the high-end architectural needs of glass facades. Bridon STYLITE® stainless sockets are manufactured using duplex stainless steel to optimise performance and minimise dimensions. The Stylite Stainless Adjustable Fork Socket

(SST-AF) provides for adjustment in cable length to account for any fabrication and construction tolerances. This is carried out using a specially designed mechanism contained within the socket which prevents any threads from being exposed, even after final adjustment. If no adjustment is necessary, a fixed version of the socket can be used. Details of other types of end terminations are available on request.





BRIDON

Carr Hill, Doncaster, South Yorkshire
DN4 8DG United Kingdom

Phone: +44(0) 1302 344010

Fax: +44(0) 1302 382223

Email: structures@bridon.com

www.bridon.com

Apêndice E

Catálogo de vidro temperado Saint-Gobain Glass

SGG SECURIT®

Toughened safety glass

Technical Sheet
United Kingdom

SGG SECURIT®

Toughened safety glass

Description

SGG SECURIT is a thermally toughened safety glass. The toughening process provides a significantly increased resistance to mechanical and thermal stresses than conventional annealed glass. If the glass breaks, it fragments safely into small pieces with dulled edges.

Applications

- **Doors:**SGG SECURIT can be used for various types of internal and external glazed doors.
- **Glass assemblies:** the sheets of glass are joined together using metal elements to create glass assemblies for the following applications:
 - Doors
 - Shop windows
 - Commercial entrances.
- **Interior furniture:**SGG SECURIT is required for use in table tops, shelving, furniture etc. in the home to reduce the risk of breakage and injury.
- **Street furniture:** telephone boxes, bus shelters, signs etc. can also be built using SGG SECURIT.
- **Facades, overhead glazing, spandrelpanels:** some applications require the use of SGG SECURIT toughened glass for safety reasons or to provide resistance against thermal and mechanical stresses.



*Waterstones, Glasgow, UK
Architect : Arnold Smith*

Advantages

- **Fragmentation** : if the glass breaks, SGG SECURIT considerably reduces the risk of injury as it fragments into small pieces with dulled edges.
- **Increased resistance to mechanical stresses**: the impact resistance and bending strength of SGG SECURIT is 5 times that of ordinary annealed glass of the same thickness.
- **Increased resistance to thermal stresses**: SGG SECURIT provides greater resistance to thermal stresses than SGG PLANILUX annealed glass.
- **Large glass assemblies**: SGG SECURIT, joined together using metal elements, can be used for large glazed areas, to minimise the appearance of support structures.
- **Transparency**: SGG SECURIT doors help improve lighting in corridors or rooms that are far from external windows. SGG SECURIT has the same spectrophotometric properties as the base product of the same thickness, prior to undergoing heat treatment.

Range

If no information is given as to the type of glass used for producing SGG SECURIT, the base product is assumed to be SGG PLANILUX clear glass. Otherwise the name of the base product is added after the name SGG SECURIT (for example: SGG SECURIT made using SGG PARSOL GREEN is called SGG SECURIT PARSOL GREEN. Most SAINT-GOBAIN GLASS products can be toughened or are available in a toughened version, except for:

- Blown glass or certain drawn glasses (SGG SAINT-JUST) - SGG PLANILAQUE and SGG CREA-LITE
- Certain references in the SGG DECORGLASS range
- Products for which toughening intrinsically changes the characteristics and/or performance of the product (e.g. the toughened versions of SGG STADIP and SGG STADIP PROTECT glass have different levels of resistance to certain types of impact from the non-toughened versions).

SGG SECURIT is available in all thicknesses from 4 to 19 mm. The maximum sizes are given in the table at the bottom of the page.

SGG SECURIT Heat-Soak Testing

To reduce the risk of toughened glass spontaneously breaking due to the presence of critical nickel sulphide (NiS) inclusions in the sheets of glass, it is advisable to put the toughened glass through an additional heat treatment known as the Heat-Soak Test (BS EN 14179). This is a destructive test which eliminates the majority of glass that is at risk. However in its current state the technique cannot eliminate 100% of the glass which is at risk. The risk of spontaneous breakage is however considerably reduced. This treatment is recommended for all situations where the stability of the structure, the maintenance of the barrier and the safety of users may be at risk from breakage of the toughened glass.

Thickness (mm)	Maximum dimensions (mm)		Minimum dimensions (mm)		Maximum weight (kg)
	Length	Width	Length	Width	
4	2400	1200	350	100	29
5	3000	2000	350	100	75
6	3660	2440	350	100	134
8	3660	2440	350	100	179
10	4500	2440	350	100	275
12	4500	2440	350	100	324
15	4500	2440	350	100	324
19	4500	2440	350	100	324

Aspect ratio: 1:10

These are typical possible dimensions available within SAINT-GOBAIN GLASS and may vary depending from one transformation site to another. Please contact us for further information.

Performance

- **Impact resistance:** Its enhanced impact resistance enables an 8 mm sheet of sGG SECURIT glass to withstand a 500g steel ball dropped from a height of 2m. For comparison, the same ball dropped from a height of 0.3 m would break 8mm annealed glass. sGG SECURIT has been tested in accordance with BS EN 12600 (pendulum test).
- **Bending strength:** sGG SECURIT is significantly more resistant to flexural stresses than conventional annealed glass. This resistance is characterised by a bending strength in the region of 120 MPa (BS EN 12150).
- **Resistance to thermal stress:** sGG SECURIT can withstand temperature differences of up to 200°C. For comparison, this temperature is around 30°C for ordinary annealed glass.

Processed Product Variations

sGG SECURIT can be:

- Sandblasted or acid etched (the maximum permitted stress will differ from that of non-treated products)
- Drilled and notched: these operations must be performed before toughening treatment (see below).
- Coated with a solar control coating (sGG SECURIT ANTELIO, sGG SECURIT COOL-LITE), a low-emissivity coating (sGG SECURIT PLANITHERM TOTAL) or a self-cleaning coating (sGG SECURIT BIOCLEAR)
- Laminated (sGG STADIP SECURIT)
- Assembled into a double-glazed unit (sGG CLIMALIT SECURIT or sGG CLIMAPLUS SECURIT)
- Enamelled (sGG EMALIT EVOLUTION)
- Screen-printed (sGG SERALIT EVOLUTION).

Glass-to-metal contact is prohibited. Cylindrical parts and the edges of notches are not suitable to bear high stresses. The toughening process of sGG SECURIT can introduce a degree of optical imperfection into the glass in the form of bow or roller wave distortion. These are inherent to the manufacturing principle and cannot be considered as a defect (see BS EN 12150).

sGG SECURIT processing characteristics

Tolerances on thicknesses are the same as for sGG PLANILUX.

Tolerance on flatness:

- Overall bow = 0.003mm/mm
- Local bow = 0.5mm/300mm

Edgeworking

sGG SECURIT edgeworking is carried out before toughening. This glass cannot be cut or edgeworked after the toughening process. The following standard edgework can be performed:

- Bevelled edge or arrised edges
- Ground or smooth ground edge
- Smooth ground or flat
- Polished edge
- Bevel.

Drilled holes have a ground edge finish as standard. Larger apertures can be smoothed or polished. Other edgeworking is available on request.

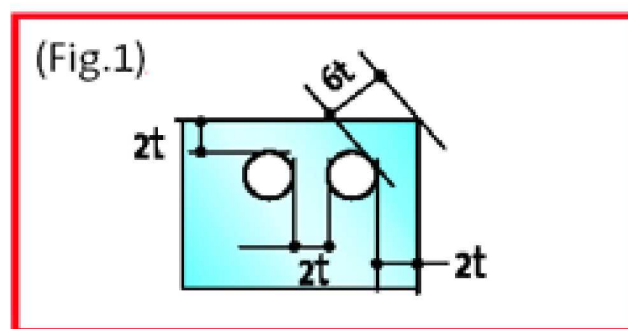
Drilling

The minimum hole diameter must be equal to the glass thickness (t). In addition, the maximum diameter (\varnothing) (or the total of the \varnothing) must be:

- $1/4$ of the width of the sheet for sGG SECURIT $t \leq 6$ mm
- $1/3$ of the width of the sheet for sGG SECURIT $t = 8, 10$ and 12 mm.

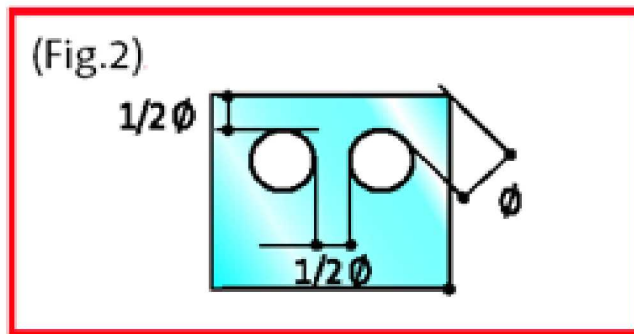
- Rules for the positioning of holes

Holes with $\varnothing \leq 40$ mm Comply with the minimum distances in the drawing below.



$t = \text{thickness of sGG SECURIT}$

Holes with $\varnothing > 40$ mm (fig 2) Comply with the minimum distances in the drawing below.



\varnothing = diameter of the hole

Tolerances on the hole position

SGG SECURIT®	
Nominal \varnothing of the hole	Tolerance in mm
5 to 50 mm	± 1.0
51 to 100 mm	± 2.0
> 100 mm	Please contact us

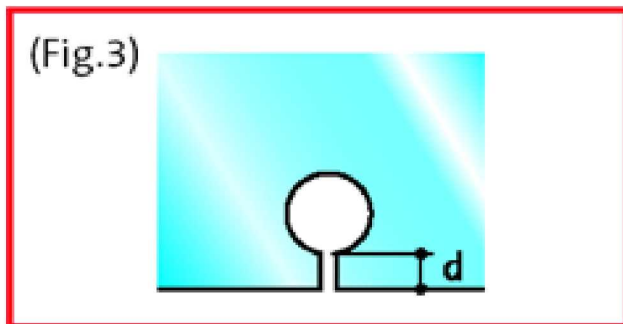
• Tolerances on hole position

Side less than 1 m: ± 2 mm

Sawn holes

Holes linked to the edge by a cutting line.

$5 \text{ mm} \leq d \leq 2 t$



t = thickness of SGG SECURIT

Tolerances on the hole position

Rectangular or square holes

$X \geq A/2$ and $Y \geq B/2$

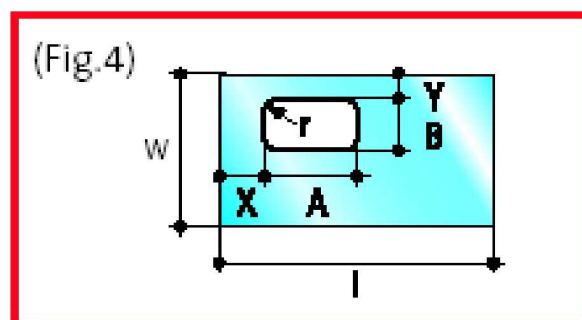
For SGG SECURIT 6 mm :

$A \leq l/4$ and $B \leq w/4$

For SGG SECURIT 8 mm :

$A \leq l/3$ and $B \leq w/3$

$r \geq 10$ mm



Tolerance on sizes

Side 5 to 50 mm: ± 1 mm

Side 51 to 100 mm: ± 2 mm

Tolerances on hole position

Tolerance on positioning: ± 1.5 mm

Notches

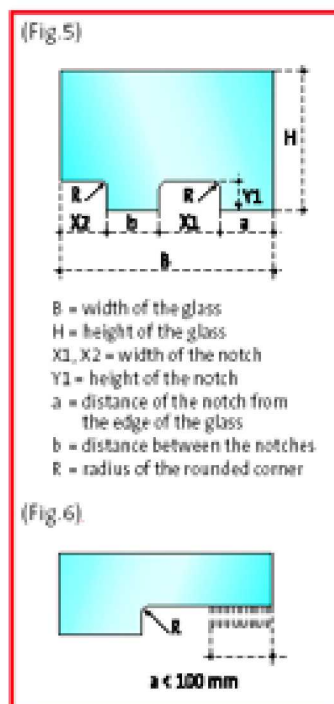
When the outer edges of the accessory are aligned with the edges of the glass, the clearance between the inner part of the accessory and the glass must always be between 4 mm (maximum) and 1 mm (minimum).

• Rules for position of notches (see fig. 5)

$Y1 \leq X1$ and $Y1 \leq X2$: the height of a notch must not exceed its width.

$b \geq X1/2$: the distance between two notches must be at least half the width of the largest notch.

$a \geq X1/2$ and $a \geq 100$ mm : the distance between the notch and the edge of the glass must be at least half the width of the notch, and this distance must be greater than 100 mm (see fig. 6). $R \geq t$: the radius of the notch must be at least equal to the thickness of the glass.



(Fig.6)



• Rules for position of angled notches

(see fig. 7)

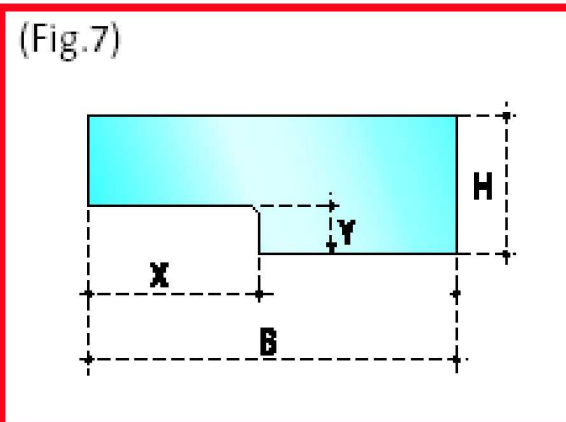
$X \leq B/3$ and $X \leq 200$ mm

$Y \leq H/3$ and $Y \leq 200$ mm

The width of the notch must not exceed 1/3 the width of the sheet of glass. For flat toughening, the width or height of the notch must not exceed 200 mm.

• Tolerances on notch position

Tolerance on positioning: ± 2 mm



Special cases

• Trapezoidal sheets

Do not exceed the length/width ratio < 8
where width = $(A + B) / 2$ and B must be at least 250 mm

• Acute angle sheets

The same rules as for trapezoidal sheets apply.
Section B (above) cannot be notched, sometimes known as "shortened corner", and is measure in the following way (in mm):

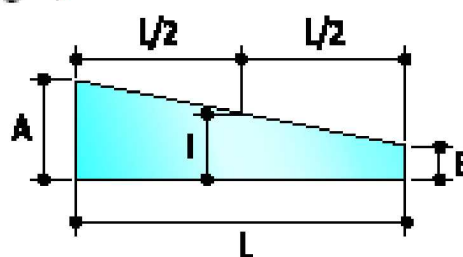
IF γ = the acute angle, (expressed in degrees)

$\gamma \leq 65^\circ$: B min = $18 - 0.2 \times \gamma$

$\gamma > 65^\circ$: B ≥ 5 mm

The guidance given above is indicative and final manufacturing confirmation should be sought from the supplying branch.

(Fig.8).



Installation Guidelines

SGG SECURIT glass must always be installed in accordance with current national standards and regulations.

The design of an SGG SECURIT assembly must comply with the following guidelines:

- Attach SGG SECURIT to the structure and ensure the assembly is rigid using wind bracings, or if necessary metal tie rods
- Ensure the sheets of glass are fully joined together. The installation must withstand all the stresses in the various planes
- Provide sufficiently strong hinges and cross bars to support the glass
- Check the thickness of ceilings or floors for the installation of closers, anchoring flanges etc.

Breaking one sheet must not result in all or part of the rest of the installation falling if the height of the installation is less than 3m. For installations higher than 3m, the simultaneous breaking of 2 sheets mustnot resulting in all or part of the rest of the installation falling.

The interfaces, support conditions and installation conditions all have a major influence on the maintenance of the mechanical properties of SGG SECURIT glass. For this reason, SAINT- GOBAIN GLASS has a wide range of parts and accessories for creating combinations and to ensure that the assembly is long-lasting.

Wind bracing

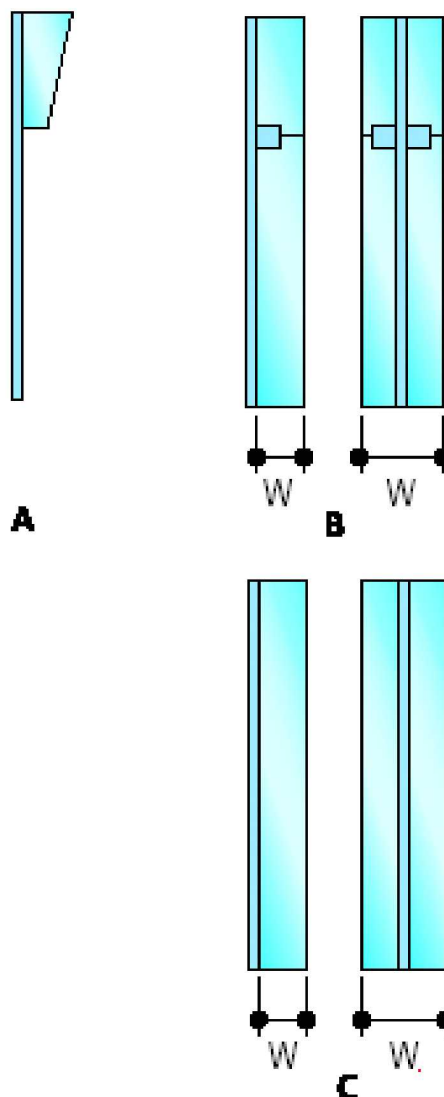
SGG SECURIT assemblies frequently require wind bracing. This ensures the resistance, rigidity and stability of structures and only bears the forces exerted in their plane of inertia. (see fig. 9)

A- High (or low) wind bracing in one sheet.

B- Wind bracing across the whole height in two sheets (or more) on one side or overlapping. Minimum width: 30 cm.

C- Wind bracing across the whole height in one sheet on one side or overlapping. Minimum width: 30 cm.

(Fig.9)

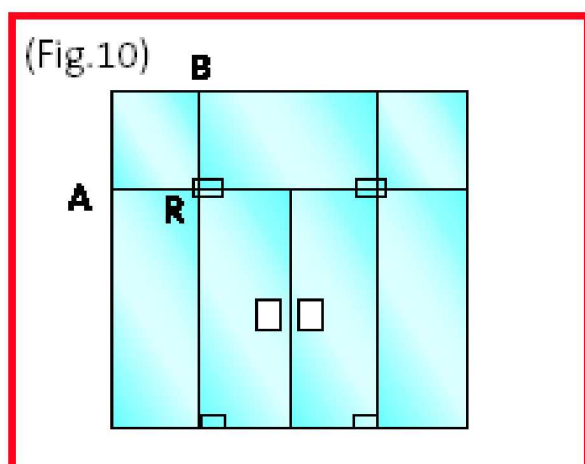


In all cases, the parameters in the table for the range and the manufacturing instructions regarding edgework must be complied with.

SGG SECURIT assemblies must be fitted with wind bracing in the following cases. If either of the dimensions AR or BR are < 30 cm, wind bracing will not be necessary, regardless of the other dimensions.

Installations with doors

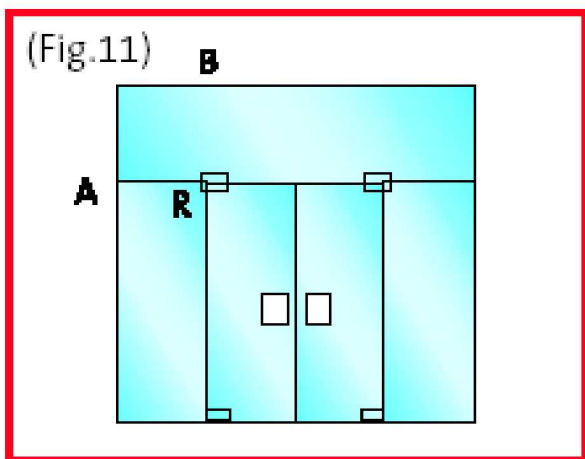
- Transom in several parts



Add wind bracing if:

- Metal glazing bead $AR + BR > 140$ cm
- Exposed anchors
- Cement housing $AR + BR > 160$ cm

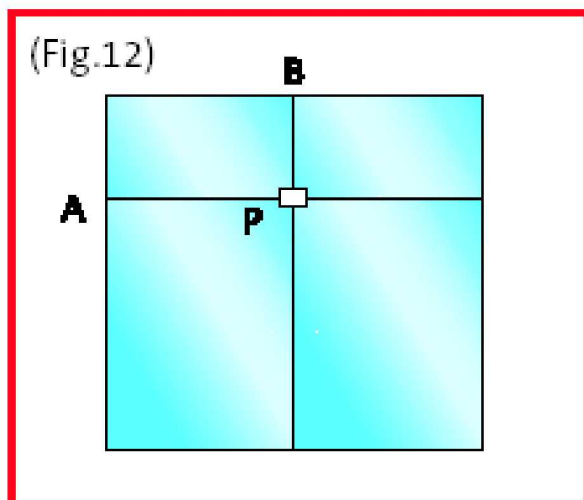
- 1-piece transom



Add wind bracing if:

- Metal glazing bead $AR + BR > 160$ cm
- Exposed anchors
- Cement housing $AR + BR > 180$ cm

Installation without doors



Add wind bracing if:
 $AP + BP > 350 \text{ cm}$

Installation extended with non-toughened glass

Wind bracing must be used:

- Clearance in the base of channels: $\leq 5 \text{ mm}$
- Clearance between sheets of glass:
 - Fixed: $\leq 3 \text{ mm}$
 - Moveable: 2 mm
- Door clearance:
 - Laterally: 2 mm
 - At the bottom: 7 mm
 - At the top:
 - Ordinary door: 3 mm
 - Folding door: 7 mm

Standards and Regulations

For sizing complying with current national regulations, see "Determining the thickness of glass". For sGG SECURIT DECORGLASS and sGG SECURIT MASTERGLASS patterned glass, the size and choice of thickness must consider the depth of the pattern on the chosen reference. In some cases, the presence of a deep design will require a thicker glass.

sGG SECURIT complies with the requirements of standard BS EN 12150. sGG SECURIT bears permanent marking indicating the processing site and the relative EN standard BS EN 12150. sGG SECURIT glass carries the relevant CE marking as required.



Martela - Helsinki, Finland
Architect: Tommila Oy

Apêndice F

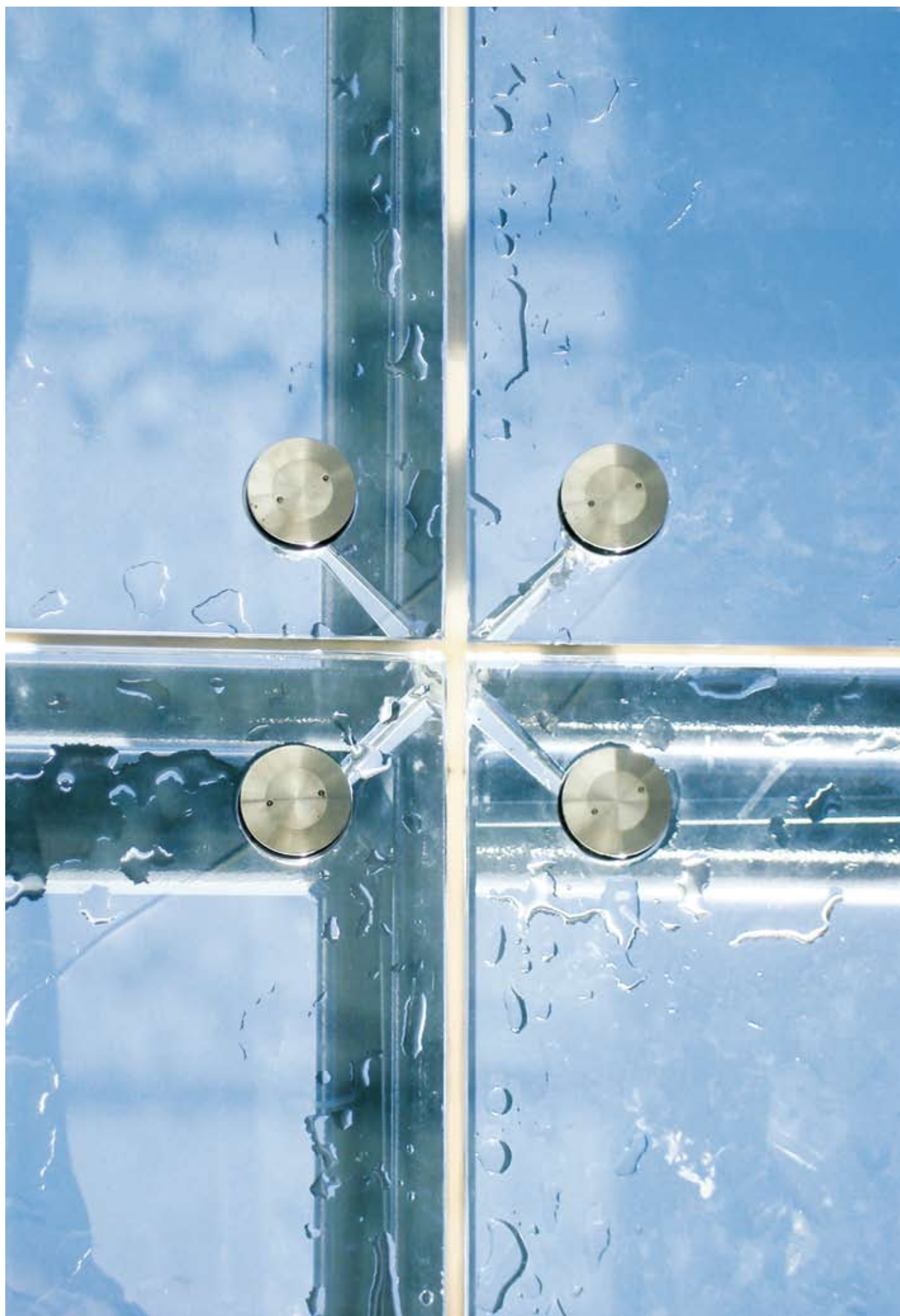
Catálogo de sistemas de fixação FITECHNIC

Fit|EChNiC

Glass Fitting System



VEA – STRUCTURAL GLAZING



PT

As fachadas agrafadas (VEA) fazem já parte, tanto da arquitectura contemporânea como na reabilitação, como forma elegante de alcançar o máximo de transparência de uma fachada. Estas fachadas podem já servir como fachadas ventiladas ou fachadas estruturais. Através do desenvolvimento inovador de soluções de Sistema **FITECHNIC** com vidros especiais, obtém-se a máxima protecção contra poluição ambiental e sonora, assim como protecção solar e térmica.

Trata-se de um simples, mas engenhoso sistema para fixar painéis de vidro (monolítico temperado, laminado temperado e duplo temperado), que permite realizar projectos limpos e esteticamente singulares.

A sua maior vantagem é a grande capacidade de regulação na instalação e potencialidades tridimensionais de desenho.

A nossa experiência e equipa técnica oferece a melhor assistência na supervisão dos projectos, para que o nosso sistema possa otimizar o máximo desempenho da fachada e das estruturas metálicas de suporte.

EN

Structural glazing (VEA) makes part of forward coming architecture as well as rehabilitation, as an elegant way of designing with most transparency. These facades can be ventilated or structural. Through the innovative development of **FITECHNIC** fitting solutions and special glasses we can get the maximum protection against ambient and noise pollution as well as solar and thermal protection.

This intelligent system is made of glass panels (monolithic tempered, laminated tempered e double glazing), which allows to construct single and visually clean projects.

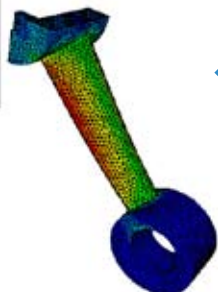
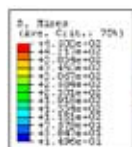
It's big advantage is the great capacity of regulation in installing great possibility in three-dimensional designing.

Our team experience will offer you best assistance in supervision of all projects so that our system can optimize the facade performance as well as the metallic structures.



PT

O sistema articulado **FITECHNIC** está patenteado e foi estudado e desenhado por meio de análise fisicamente não linear com elementos finitos e posteriormente comprovadas através de ensaios de resistência mecânica em laboratórios independentes. A análise matemática e testes de cargas verificam a resistência necessária em força combinada, tanto na vertical como na horizontal.

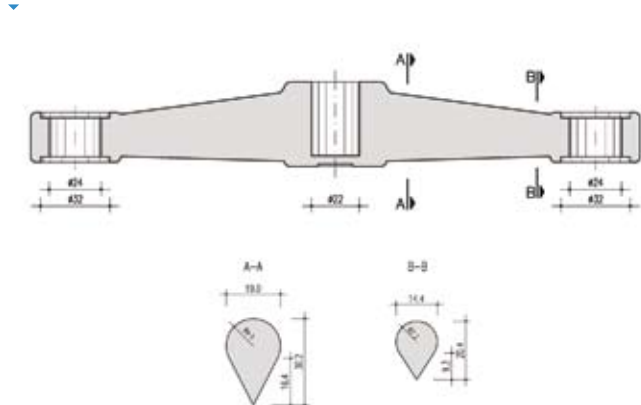


↙ Análise matemática não linear com elementos finitos.
Nonlinear dynamic analysis.



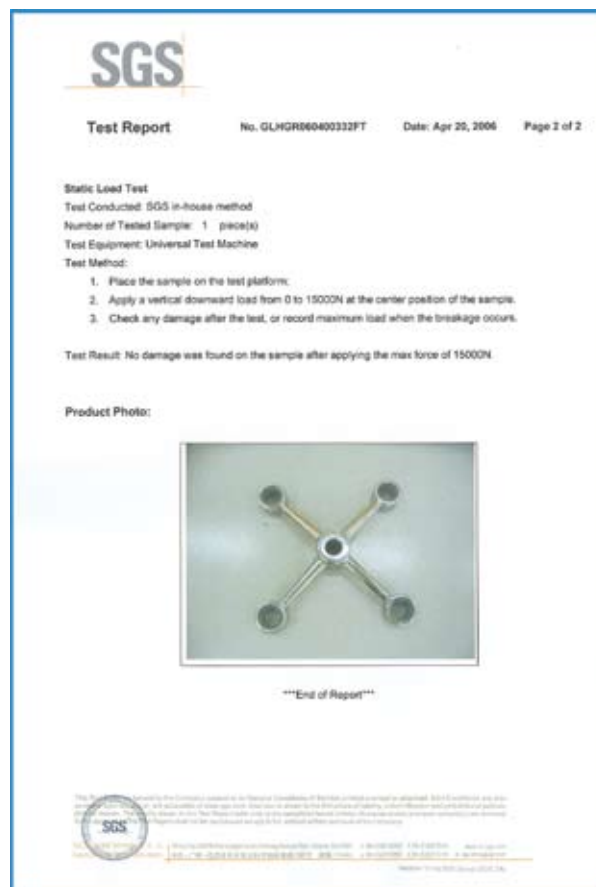
↗ Ensaios de resistência mecânica.
Mechanical destructive tests.

Precisão dimensional CNC.
CNC dimensional precision.

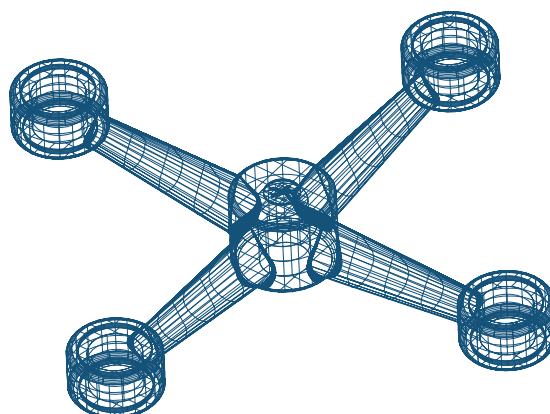


EN

The registered articulated system **FITECHNIC** has been studied and designed by nonlinear dynamic analysis and afterward confirmed through mechanical destructive tests in independent laboratories. All tests prove strong resistance to a combined force in vertical as well as in horizontal.



↗ A Inspeção e Controle de Qualidade tem a garantia SGS.
Inspection and Quality Control is assured by SGS.



↗ Modelação 3D.
3D modelling.



FI 4V braços / FI 4V arms



FI 1V braço / FI 1V arm



FI 3V braços / FI 3V arms



FI 1H braço / FI 1H arm



FI 2V braços / FI 2V arms



FI 2H braços / FI 2H arms



PT

Aranhas

Aranhas para união de vidros em aço inox AISI 316 fabricada em microfusão a cera perdida com acabamento superficial polido brilhante-espelho e mecanizada em linha CNC.

Distância entre eixos 170 mm.

EN

Spiders

Spider for 4 glasses in stainless steel AISI 316, made in a micro fusion process with polished finishing and mechanized in CNC line.

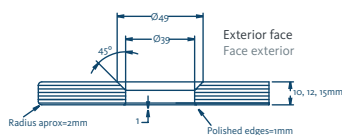
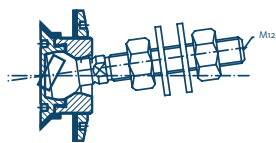
Arm distance between hole and central axis 170 mm.

PT

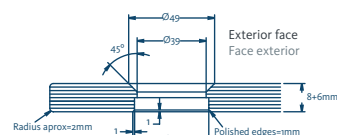
Rótulas

EN

Articulated bolts



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RE10-15/M12.
Hole detail for tempered glass rotule RE10-15/M12.

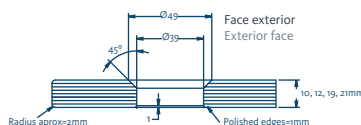
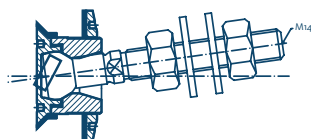


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RE10-15/M12.
Hole detail for laminated tempered glass rotule RE10-15/M12.

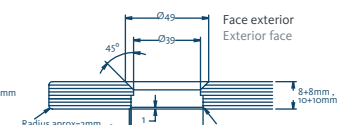
RE10-15M12

Rótula em aço inox AISI316 para fachada de vidro temperado entre 10 e 15mm - tronco cônico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for facade in monolithic tempered glass 10 to 15mm - conic hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RE12-21/M14.
Hole detail for tempered glass rotule RE12-21/M14.

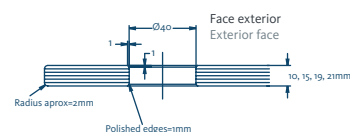
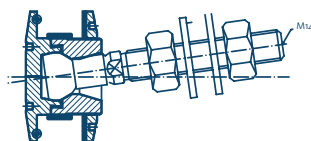


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RE12-21/M14.
Hole detail for laminated tempered glass rotule RE12-21/M14.

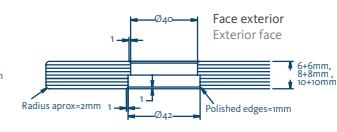
RE12-21M14

Rótula em aço inox AISI316 para fachada de vidro temperado entre 12 e 21mm - tronco cônico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for facade in monolithic tempered glass 12 to 21mm - conic hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RT12-21/M14.
Hole detail for tempered glass rotule RT12-21/M14.

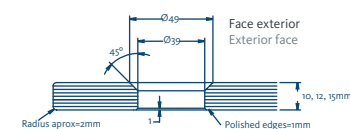
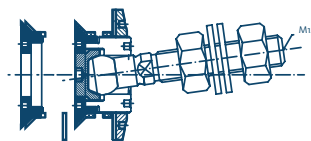


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RT12-21/M14.
Hole detail for laminated tempered glass rotule RT12-21/M14.

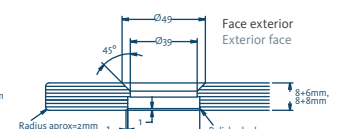
RT12-21M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa para fachadas/coberturas em vidro laminado e temperado 12 a 21mm - furo cilíndrico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for facades/roof glazing in laminated tempered glass 12 to 21mm - cylindrical hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula REC10-16/M14.
Hole detail for tempered glass rotule REC10-16/M14.



▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula REC10-16/M14.
Hole detail for laminated tempered glass rotule REC10-16/M14.

REC10-16M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa cônica de aperto exterior para fachada em vidro temperado 10 a 16mm - tronco cônico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with conic cap for exterior installation for facades in tempered or laminated tempered glass 10 to 16mm - conic hole.

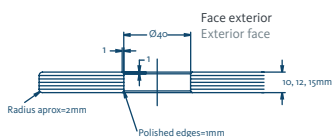
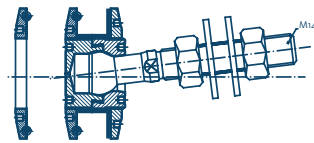


PT

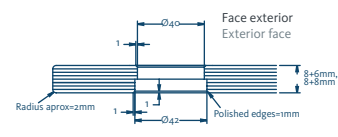
Rótulas

EN

Articulated bolts



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RCT10-16/M14.
Hole detail for tempered glass rotule RCT10-16/M14.

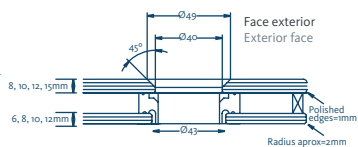
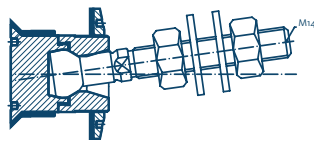


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RCT10-16/M14.
Hole detail for laminated tempered glass rotule RCT10-16/M14.

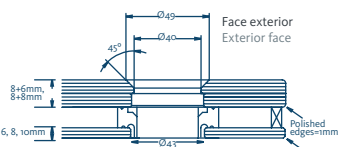
RCT10-16M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa de aperto exterior para fachadas/coberturas em vidro laminado e temperado 12 a 16mm - furo cilíndrico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for exterior installation facades/roof glazing in laminated tempered glass 12 to 16mm - cylindrical hole.



▲ Detalhe do furo para vidro temperado rótula RD28-36/M14.
Hole detail for tempered glass rotule RD28-36/M14.

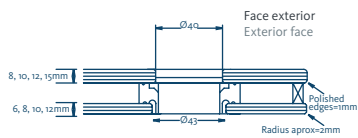
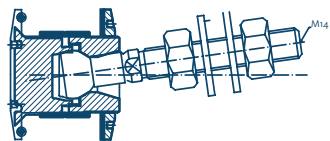


▲ Detalhe do furo para vidro laminado rótula RD28-36/M14.
Hole detail for laminated tempered glass rotule RD28-36/M14.

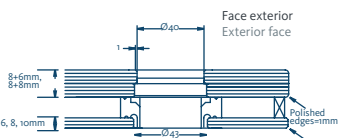
RD28-36M14

Rótula em aço inox AISI316 para fachadas em vidro duplo temperado 28 a 36mm – tronco cónico.

Articulated bolt in stainless steel AISI316 for double glazing facade in tempered glass 28 to 36mm – conic hole.



▲ Detalhe de furo para vidro temperado com camara rótula RDT28-36/M14.
Hole detail for doble glazing tempered glass rotule RDT28-36/M14.



▲ Detalhe de furo para vidro laminado com camara rótula RDT28-36/M14.
Hole detail for doble glazing laminated glass rotule RDT28-36/M14.

RDT28-36M14

Rótula em aço inox AISI316 de tampa para fachadas/coberturas em vidro duplo temperado 28 a 36mm - furo cilíndrico.

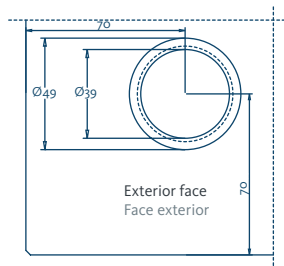
Articulated bolt in stainless steel AISI316 with cap for double glazing facades/roof glazing in tempered glass 28 to 36mm - cylindrical hole.

PT

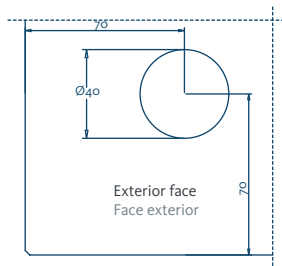
Detalhes dos furos

EN

Holes / drill details



▲ Detalhe para furo cónico .
Detail for conic hole.



▲ Detalhe para furo cilíndrico.
Detail for cylindrical hole.



PT

Complementos



EN

Complements

FI-C81

Conector em aço inox AISI 316 M24 para ligação a estrutura montante.

Thread union screw in stainless steel AISI 316 M24 to be fixed to main structure.



FI-TT

Teton em aço inox AISI 316 M24 para ligação a estrutura montante

Base support in stainless steel AISI 316 M24 to be fixed to main structure



RZ12-24

Rótula Articulada em aço inox AISI316 para ligação parede/pavimento e vidro temperado entre 12 e 24mm.

Articulated rotule in stainless steel AISI316 to connect to wall/pavement and tempered glass 12 to 24mm.



RSE12-21M10

Rótula fixa em aço inox AISI316 de aperto exterior para aplicação interior de vidro temperado 12 a 21mm.

Fixed bolt in stainless steel AISI316 for interior application in tempered glass 12 to 21mm.

PT

Fachadas especiais

Fachadas em cabos estruturais em aço inox AISI 316 permitem vencer vãos sem recurso a estruturas montantes. Através de aranhas ligadas a bielas e por sua vez entrelaçadas por cabos rígidos tensionados obtém-se a máxima transparência e ótima aparência estética.

EN

Special facades

A structural glazing facade with stainless steel cables allows cleaner facades without metallic structures. Using spiders connected with rod and through the tensioned cables we can obtain maximum transparency and optimum visual aesthetical appearance.



FI-CAB

Cabo rígido 1x19 em aço inox AISI316 com tensor e 2 garfos de diâmetro variável.

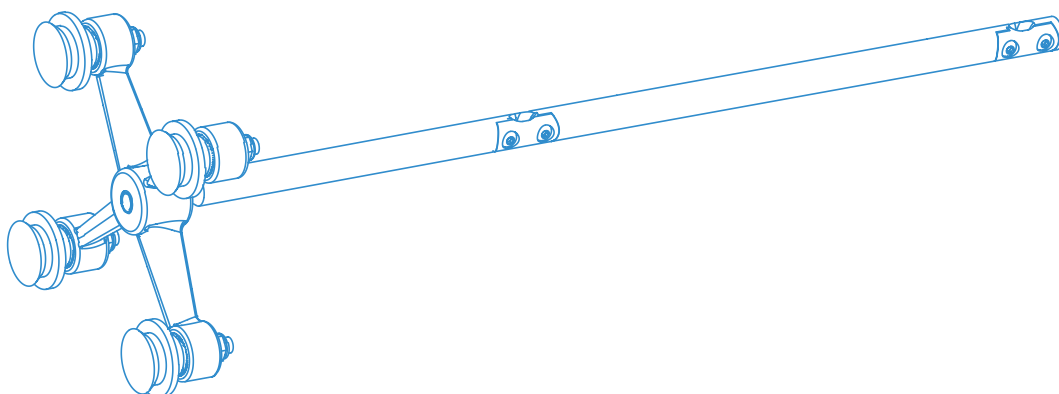
Cable in Stainless steel AISI316 with turnbuckle and 2 forks variable diameter.

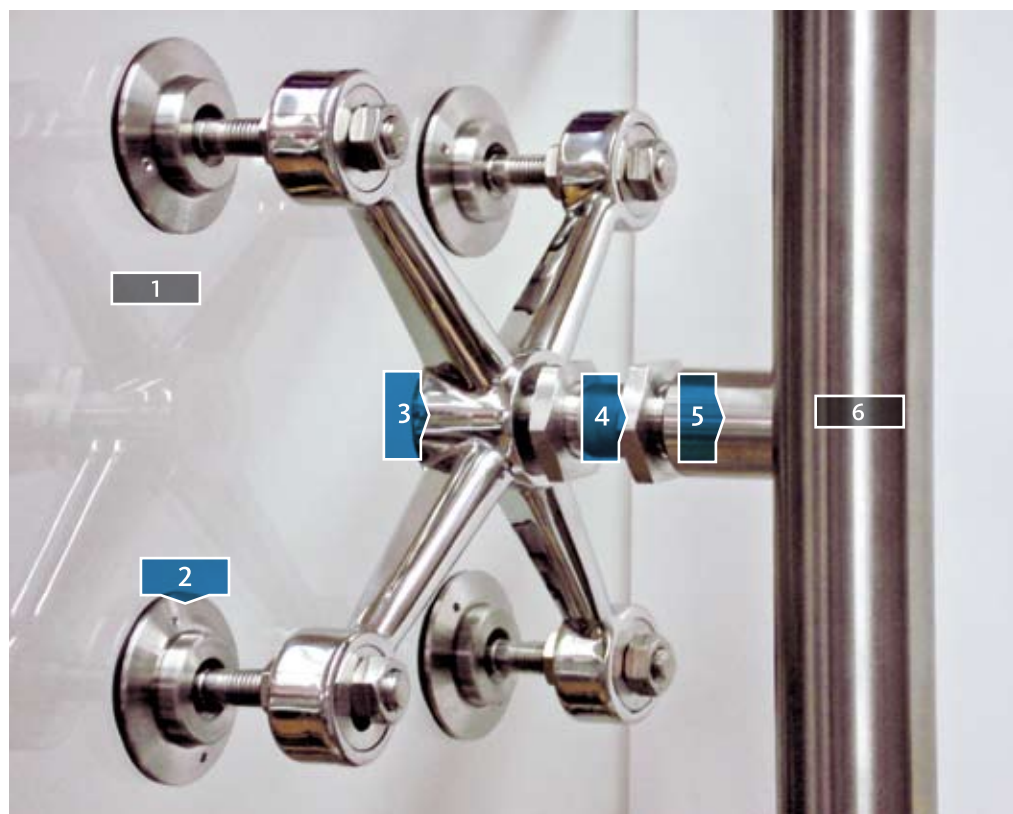


FI-VAR

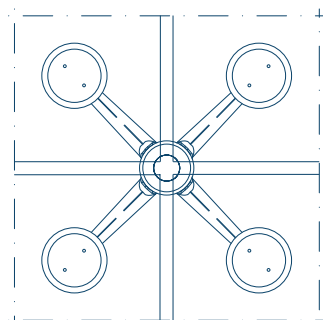
Varão roscado em aço inox AISI316 com tensor e 2 garfos de diâmetro variável.

Rod in Stainless steel AISI316 with turnbuckle and 2 forks variable diameter.

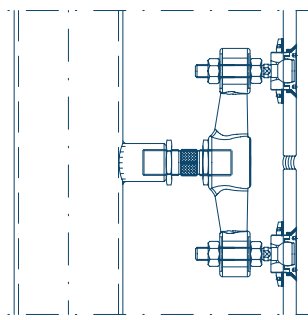




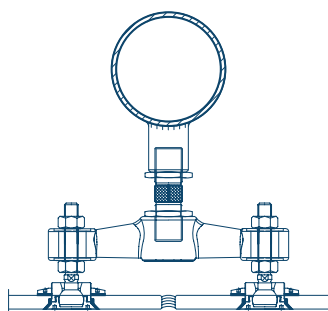
- 1** Vidro
Glass
- 2** Rótula
Articulated bolt
ref^o RE1015/M12
- 3** Aranha
Spider
ref^o FI-4V
- 4** Conector
Threaded union screw
ref^o FI-C81
- 5** Teton
Base support
ref^o FI-TT
- 6** Estrutura
Main structure



▲ Vista de frente exterior da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.
Exterior front view **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.



▲ Secção vertical da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.
Vertical section **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.



▲ Secção horizontal da aranha **FITECHNIC** com rótula RE10-15.
Horizontal section **FITECHNIC** spider with rotule RE10-15.

